

可視近赤外線同時カメラ HONIR における
一露出型偏光観測モードの性能評価

広島大学 理学部 物理科学科
高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室

B134045 長木舞子

指導教員:深澤泰司
主査:川端弘治 副査:松尾光一

2017年2月

概要

HONIR は可視光近赤外線同時観測が可能な装置であり、かなた望遠鏡の主力となっている。かなた望遠鏡の観測研究の一つにガンマ線バーストの残光の偏光観測がある。偏光観測により、その発光領域の磁場構造の推定が可能となる。しかし、そのような偏光観測例は世界的に見ても少なく、可視光近赤外線同時観測のデータはさらに稀である。ガンマ線バーストの残光は時間変化が速く、4回の露出が必要な通常の偏光観測では同時性のある偏光測定は困難である。

本研究では、1回の露出で観測が可能なダブルウォラストンプリズムを導入し、それを用いた偏光観測の性能を評価した。一露出型偏光観測モードでは、常光と異常光の透過効率比 (k_e/k_o) の安定性が特に重要である。多数の標準星観測の結果、一露出型モードでも観測前後で得た k_e/k_o を用いた場合は誤差 0.3% 以内の安定した偏光測定精度が得られるものの、異なる日の k_e/k_o を用いた場合は可視でも 0.4% 程度の誤差を生じる場合があることがわかった。本論文では偏光能率や偏光方位角原点とその安定性、さらに視野内依存性についても議論する。

目次

| | | |
|-------|-------------------------------|----|
| 第 1 章 | 序論 | 4 |
| 1.1 | 天体の偏光 | 4 |
| 1.1.1 | 偏光とストークスパラメータ | 4 |
| 1.1.2 | 偏光を示す天体 | 5 |
| 1.2 | かなた望遠鏡 | 8 |
| 1.2.1 | 望遠鏡の構造と仕様 | 9 |
| 1.3 | 可視近赤外線同時カメラ HONIR | 10 |
| 1.3.1 | 基本仕様 | 10 |
| 1.3.2 | 光学系 | 10 |
| 1.3.3 | 駆動制御系 | 13 |
| 1.3.4 | ワイヤグリッド | 18 |
| 1.4 | $LiYF_4$ 製ウェッジ付きダブルウォラストンプリズム | 18 |
| 1.5 | 本研究の目的 | 20 |
| 第 2 章 | HONIR の一露出型偏光観測モード | 21 |
| 2.1 | 一露出型偏光観測法 | 21 |
| 2.1.1 | 通常の偏光観測モードのストークスパラメータの導出 | 21 |
| 2.1.2 | 一露出型偏光観測モードのストークスパラメータの導出 | 22 |
| 2.1.3 | 半波長板回転時の偏光観測 | 24 |
| 2.1.4 | 偏光観測法の比較 | 25 |
| 2.2 | 必要なキャリブレーション | 25 |
| 2.2.1 | 器械偏光 | 25 |
| 2.2.2 | 消偏光効果 | 26 |
| 2.2.3 | 方位角原点 | 26 |
| 第 3 章 | 観測とデータリダクション | 27 |
| 3.1 | 調査項目 | 27 |
| 3.2 | 観測 | 28 |
| 3.2.1 | 観測方法 | 28 |
| 3.2.2 | 観測天体 | 29 |
| 3.3 | データリダクション | 29 |
| 3.3.1 | データ取得 | 31 |
| 3.3.2 | 一次処理 | 31 |

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 3.3.3 | 開口測光 | 33 |
| 第 4 章 | 結果と考察 | 35 |
| 4.1 | 観測結果 | 35 |
| 4.1.1 | 器械偏光の安定性 | 35 |
| 4.1.2 | 偏光能率の波長依存性、偏光方位角の波長依存性 | 43 |
| 4.1.3 | 天球上での偏光方位角原点 | 46 |
| 4.1.4 | 視野内依存性 | 52 |
| 4.2 | 瞳像の確認 | 59 |
| 4.2.1 | ダブルウォラストンプリズムの視野座標の違いによる透過光量比の違い | 59 |
| 4.2.2 | ローテータを回転した際の瞳像の変化 | 65 |
| 4.3 | 一露出型偏光モードの性能評価 | 67 |
| 第 5 章 | まとめと今後 | 69 |
| 第 6 章 | 付録 | 70 |
| 6.1 | ミューラー行列を用いたストークスパラメータの導出 | 70 |
| 6.1.1 | 通常の偏光観測モードの常光と異常光の強度 ($I_o(\theta)$ 、 $I_e(\theta)$) の導出 | 71 |
| 6.1.2 | 一露出型偏光観測モードのストークスパラメータの導出 | 72 |

表 目 次

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | かなた望遠鏡の仕様 | 10 |
| 1.2 | HONIR の基本仕様 [5] | 11 |
| 1.3 | バンドごとの波長帯 | 15 |
| 3.1 | 観測天体 | 29 |
| 4.1 | 常光と異常光の透過効率比 (k_e/k_o) のデータ | 36 |
| 4.2 | 波長別の常光と異常光の透過効率比 | 37 |
| 4.3 | 観測モードの表記 | 37 |
| 4.4 | HD14069 の偏光データ | 38 |
| 4.5 | HD12021 の偏光データ | 39 |
| 4.6 | HD212311 の偏光データ | 40 |
| 4.7 | QU の典型的なズレ | 41 |
| 4.8 | ワイヤーグリッドの偏光データ (TYC1926-873-1) | 44 |
| 4.9 | ワイヤーグリッドの偏光データ (BD+25 2272) | 45 |
| 4.10 | モードごとの H バンドの偏光方位角の R バンドに対する回転量 | 46 |
| 4.11 | R バンド、H バンドの偏光能率 (単位:%) | 47 |
| 4.12 | 2017 年 1 月 11 日 BD+64d106 の偏光データ | 48 |
| 4.13 | 2017 年 1 月 19 日 HD251204 の偏光データ | 48 |
| 4.14 | 2017 年 2 月 21 日 HD155197 の偏光データ | 49 |
| 4.15 | 2017 年 4 月 13 日 HD251204 の偏光データ | 49 |
| 4.16 | 2017 年 4 月 13 日 HD155197 の偏光データ | 50 |
| 4.17 | R バンドの各モードでの器械座標と天球座標の偏光方位角の差 (単位:度) | 51 |
| 4.18 | R バンドの各モードでのオフセット角 (単位:度) | 52 |
| 4.19 | 視野内依存性の観測 | 52 |
| 4.20 | 2017 年 1 月 25 日 HD251204 の偏光データ (視野内依存性) | 53 |
| 4.21 | 視野内依存性の観測における視野中心との比較 (R バンド) | 54 |
| 4.22 | 2017 年 2 月 21 日 HD94851 の偏光データ (視野内依存性) | 56 |
| 4.23 | 2017 年 2 月 21 日 HD94851 の偏光データ (視野内依存性、通常の偏光観測モード成分) | 57 |
| 4.24 | 2017 年 4 月 27 日 HD154892 の偏光データ (視野内依存性、R バンドのみ) | 58 |
| 4.25 | x 軸方向の光量の変化と瞳像のずれ | 63 |

第1章 序論

1.1 天体の偏光

1.1.1 偏光とストークスパラメータ

光は空間を伝わる電磁波で、進行方向に対して電場と磁場が垂直に振動している。すなわち、横波である光にはその振動に方向性がある。振動の方向がある向きに偏った一郡の光を偏光と呼ぶ。物質にエネルギーを伝えるのは電場成分であるので、通常は電場の振動する向きを偏光方向と呼ぶ。自然光は、ランダムな方向の振動が混在しており無偏光な状態にある。これに対し、振動が直線的で一つの平面内に乗っている光を直線偏光と呼び、他には振動面が回転しながら進む光である円偏光と楕円偏光がある。本論文では直線偏光のみを扱うため、単に偏光と言った場合は直線偏光を示すものとする。

電磁波を平面波として考えてその伝搬方向を z 軸にとる。位相を $\tau = \omega t - kz$ で示すと電場成分は以下のように表せる。

$$E_x = a_1 \cos(\tau + \delta_1), E_y = a_2 \cos(\tau + \delta_2)$$

ここで $\delta \equiv \delta_2 - \delta_1$ とし、 $\delta = \frac{\pi}{2}$ のとき

$$E_x = a_1 \cos(\tau + \delta_1), E_y = -a_2 \sin(\tau + \delta_1)$$

であり、 $a_1 = a_2$ なら右回りの円偏光となる。また、 $\delta = 0$ 、及び $n\pi$ (n は整数) の場合は直線偏光となる。

偏光は一般的に、どのくらい偏光しているかを表す偏光度 P と、どの方向に偏光しているのかを表す偏光方位角 θ で記述する。しかしベクトル的に扱う場合には、 P と θ を用いた表現では計算が複雑になってしまう。そこで本研究ではストークスパラメータ (Stokes parameters) と呼ばれる以下の式で定義される4つの物理量で偏光を考えるものとする。

$$I = a_1^2 + a_2^2 \quad (1.1)$$

$$Q = a_1^2 - a_2^2 \quad (1.2)$$

$$U = 2a_1 a_2 \cos \delta \quad (1.3)$$

$$V = 2a_1 a_2 \sin \delta \quad (1.4)$$

ここで、 I は光の強度に関するパラメーター、 Q 、 U は直線偏光に関するパラメーターである。一方 V は円偏光に関するパラメーターであり、本論文では直線偏光のみを扱うため $V = 0$ として考える。これらの間には

$$I^2 = Q^2 + U^2 + V^2$$

のような関係が成り立つので独立なパラメータは3つである。

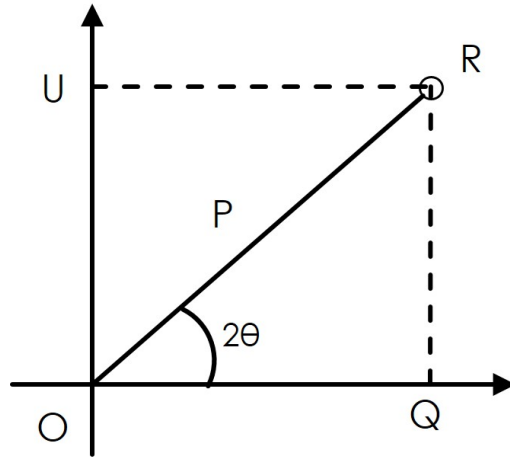


図 1.1: ストックスパラメータ Q, U と P, θ の関係

ストックスパラメータを用いると (直線) 偏光度 P と偏光方位角 θ は以下のように表される。

$$P = \frac{\sqrt{(Q^2 + U^2)}}{I} \quad (1.5)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{U}{Q} \right) \quad (1.6)$$

横軸を $\frac{Q}{I}$ 、縦軸を $\frac{U}{I}$ とした図 1.1 のような QU 平面を考えると線分 OR の長さが偏光度 P 、この線分と $\frac{Q}{I}$ の軸の間の角の半分が偏光方位角 θ となる。

1.1.2 偏光を示す天体

代表的な偏光天体ないし天体における偏光現象として、星間微粒子 (固体微粒子、ダスト) による星間偏光、星周物質 (自由電子、ダスト) による中心星の光の散乱、シンクロトロン放射¹などがある。そのため偏光観測を行うことにより、星間偏光であれば星間磁場の向きやダストの性質が、散乱による偏光であれば散乱体の性質や分布が、シンクロトロン放射による偏光であればその発光領域の磁場構造の推定が、それぞれ可能となる。

シンクロトロン放射をする天体または天体現象の例としては、ガンマ線バーストの残光やブレーザーが挙げられる。これらは時間変化が早く、ガンマ線バーストの残光では 10 秒程度のスケールで変化を示す。大型の CCD を用いた観測では、一回の露出あたり数秒から 20 数秒の読み出し時間を要することから、4 回の露出が必要である通常の偏光観測では同時性のある偏光測定は困難である。

¹ 電子を磁場の中で運動させると、電子の進行方向と磁場の方向に直角な力 (ローレンツ力) を受け、円運動をする。円運動は加速度運動のため、電磁波が放射される。電子の速度が遅い時にはサイクロトロン放射、光速に近い相対論的な場合はシンクロトロン放射と呼ぶ。

1.1.2.1 ガンマ線バースト (GRB)

ガンマ線バーストは宇宙最大の爆発である。その発生起源については発見から 30 年経ってようやく、宇宙論的距離 (数十億光年) で起こっている現象であることが判ったが、依然明らかでない面も多くある。

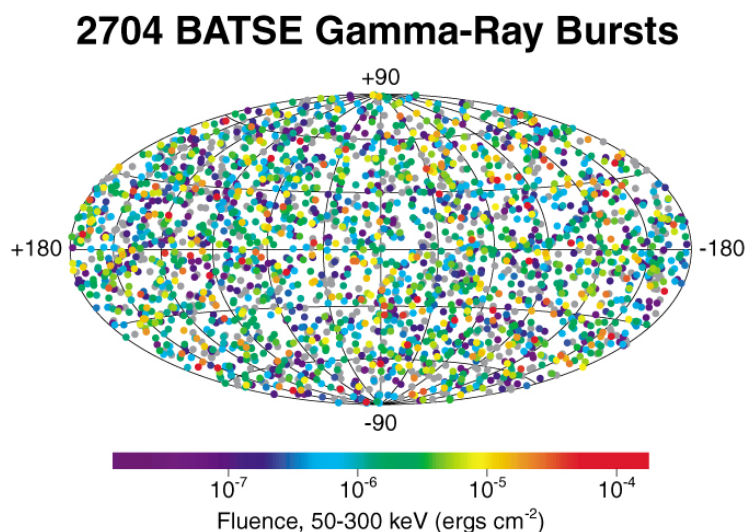


図 1.2: BATSE 観測装置が捉えた 2704 例のガンマ線バーストの到来方向分布 [8]

1967 年、核実験探知衛星「VELA」によってガンマ線バーストが発見された。ガンマ線バーストは高エネルギー突発現象のひとつで、継続時間、光度曲線は様々である。例えば継続時間は、約 10 ミリ秒のものから 1000 秒以上に及ぶものまでである。いつどこで発生するかもわからないもので、短期間しか輝かないため、方向を決定することが困難な放射である。ガンマ線衛星「CGRO」搭載の BATSE(Burst And Transient Source Experiment) の観測によって得られた 2704 例のガンマ線バーストの方向分布を銀座座標にプロットした。図 1.2 からわかるように、ガンマ線バーストは天球上に一様に分布するものであることが明らかになった。

一方、X 線天文衛星「BeppoSAX」に搭載された広視野 X 線カメラ (WFC) は、ガンマ線バースト GRB970228 をから X 線を検出し、位置を特定したのちに主観測装置の X 線望遠鏡をその位置に向けた。その後可視光の観測で X 線望遠鏡で発見した X 線天体と同じ位置に可視光でも輝く天体が発見され、どちらもべき関数的に減光する様子が観測された。図 1.3、1.4 が実際の写真であり、減光が早いことが伺える。可視光でのガンマ線バースト残光の発見により、ガンマ線バーストの位置がより正確に決定できるようになり、そのスペクトル観測から母銀河の赤方偏移が決定できるようになった。GRB970508 の母銀河の赤方偏移が $z=0.835$ (約 69 億光年) という結果から、ガンマ線バーストは銀河系外で発生する現象と明らかになった。

ガンマ線バーストの残光はシンクロトロン放射が有力な発光機構であり、観測される光は偏光していることが期待される。

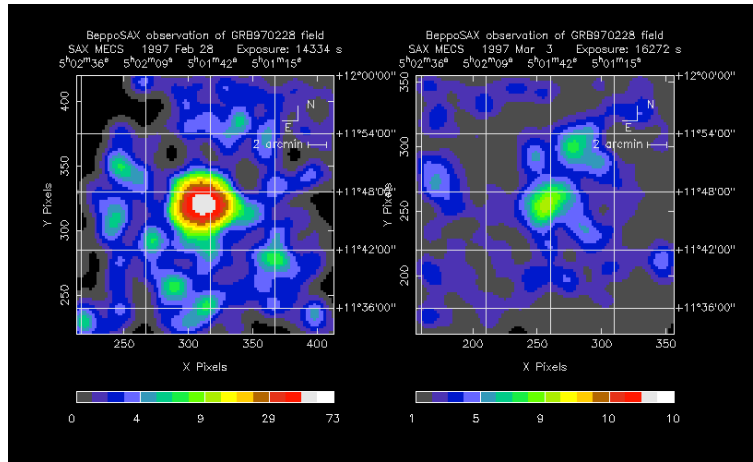


図 1.3: GRB970228 の X 線写真 [7]。左が 1997/2/28、右が 1997/3/3 撮影。

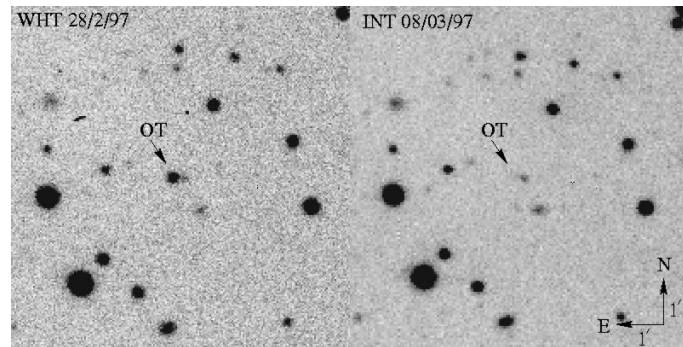


図 1.4: GRB970228 の残光の可視光写真 [7]。左が 1997/2/28、右が 1997/3/8 撮影。

1.1.2.2 ブレーザー

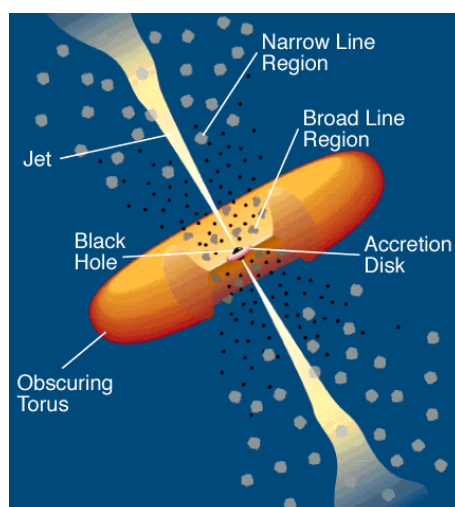


図 1.5: 活動銀河核のモデル [12]

銀河にも様々な種類があり、中心領域の明るさが銀河全体の明るさと同等またはそれ以上の銀河が存在する。その中心には超巨大ブラックホールが存在すると考えられており、これらの銀河を活動銀河と呼び、その中心核を活動銀河核と呼ぶ。図 1.5 は活動銀河核のモデルであり、図中の Jet (ジェット) が視線方向に向いている天体をブレーザーと呼ぶ。ジェットは光速に近い速度のプラズマが噴出する現象であり、その放射は電波からガンマ線まで幅広い放射領域で観測され、ジェット中に存在する相対論的速度の電子のシンクロトロン放射は、電波から可視光域で強い偏光を示すことが知られている。電子とシンクロトロン放射によってエネルギーの低くなった光子の逆コンプトン散乱による放射と考えられている。活動銀河核ジェットに対して多くの研究がなされてきたが、ジェットの構造や放射機構は未だ明らかではない。

1.2 かなた望遠鏡

かなた望遠鏡 (図 1.6) は宇宙科学センター附属東広島天文台 (図 1.7) に設置されている 1.5m 光学赤外線望遠鏡である。これはもともと大学共同利用機関である国立天文台がその三鷹キャンパス内で「赤外シュミレータ」という名前で所有していたもので、主にすばる望遠鏡の観測装置の試験に活躍していた。広島大学は 2006 年にこの望遠鏡を東広島市東南部の山頂へ移設し望遠鏡制御系の改良、新しい装置の開発を進めて研究基盤を充実させてきた。

望遠鏡の集光力を決めるのは主鏡の大きさであり、かなた望遠鏡の主鏡の有効径は 1.5m と国内最大級である。また、任意の天体に対して 50 秒以内に指向可能であるという、このサイズの望遠鏡では世界的に見ても高い駆動性能を有している。さらに広島大学が所有する望遠鏡であるので、共同利用型望遠鏡のように他の観測に縛られることなく研究をすすめることが可能である。以上の利点を生かして、かなた望遠鏡では突発天体の即時観測を行なっている。現在はナスミス焦点に取り付けられた HOWPol において、発生後から急激に減光するガンマ線バーストに対して、その残光を可視光で自動的に観測を開始できるシステ

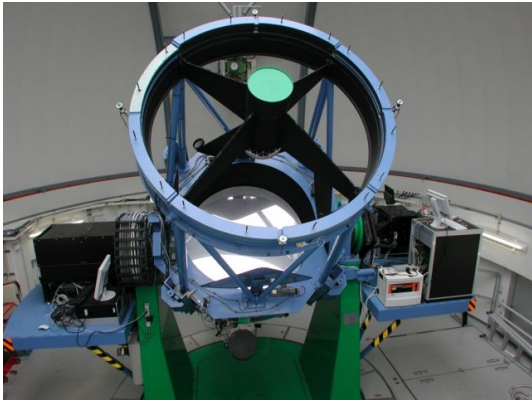


図 1.6: かなた望遠鏡 [4]



図 1.7: 東広島天文台 [4]

ムを用いている。それは、人工衛星からのアラートを受けた時に即座に天体の座標を特定して自動的に追尾観測を行うというものである。また、2008年に打ち上げられたガンマ線衛星の Fermi とも連携した観測も行っており、ガンマ線バーストの残光の観測の体制が強化されてきている。しかし、現在でもガンマ線バーストの残光の偏光観測データは世界的に見ても少なく、今後も当面はかなた望遠鏡ではガンマ線バーストの残光に対する偏光観測を優先的に行うことを目標としている。

1.2.1 望遠鏡の構造と仕様

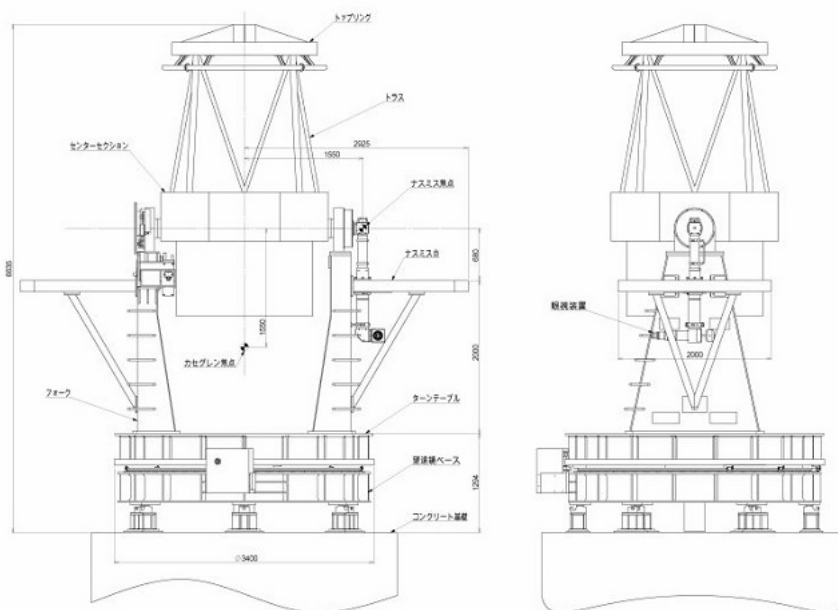


図 1.8: かなた望遠鏡外観図 ((株) 西村製作所 提供)[4]

かなた望遠鏡の構造は図 1.8 のようになっている。ドームの回転や人の動きによる振動が望遠鏡に伝わることが無いように、望遠鏡はドーム施設とは独立した基礎を持つ設計となっている。有効径 1.5m の主鏡は中央がへこんだ凹面鏡となっており、副鏡は凸面鏡でトップリングに据え付けられている。望遠鏡で集められた光は第 3 鏡 (平面鏡) の着脱により、ナスミス焦点がカセグレン焦点のいずれか一方に像を結ぶ。現在カセグレン焦点には可視近赤外線同時カメラ HONIR(Hiroshima Optical Near-InfraRed camera) が、ナスミス焦点には一露出型広視野偏光撮像器 HOWPol(Hiroshima One-shot Wide-field Polarimeter) が取り付けられている。かなた望遠鏡の基本仕様を表 1.1 に示す。

表 1.1: かなた望遠鏡の仕様

| 項目 | 仕様 |
|---------------------|------------------------------------|
| 光学系 | リッチー・クレティアン (Ritchey-Chretien) 光学系 |
| 主鏡 | 有効径 1500mm |
| 焦点距離 | 18,501.7mm |
| 合成 F 値 (焦点距離 ÷ 有効径) | F/12.3 |
| 視野 | 直径 15 分角 (0.25 度) |
| 焦点面スケール | 11.148 秒角/mm |
| 架台 | 経緯台 (方向軸周り 5 度/秒 高度軸周り 2 度/秒) |
| 総重量 | 約 17 トン |
| 搭載可能重量 | カセグレン焦点 500kg ナスミス焦点 1000kg |

1.3 可視近赤外線同時カメラ HONIR

1.3.1 基本仕様

HONIR(図 1.9) はかなた望遠鏡のカセグレン焦点に取り付けられており、軸対称で反射するため器械偏光が小さく、偏光観測に適している。また、最大で 3 色 (可視光 1 色、近赤外線 2 色) 同時撮像が可能である。HONIR が設置される以前は名古屋大学で開発された TRISPEC を用いていた。しかし、この装置はすばる望遠鏡やイギリス赤外線望遠鏡 (United Kingdom Infra-Red Telescope, UKIRT) を想定して開発されたものであり、視野が狭い上にピクセルスケールが荒く、かなた望遠鏡の性能を完全に引き出せてはいなかった。また、老朽化も進みつつあったことから、かなた望遠鏡の性能を最大限活かすために 2007 年より HONIR の開発が開始された。HONIR の基本仕様は表 1.2 に示す。

1.3.2 光学系

図 1.10 において左側から来る入射光をコリメータレンズ群で平行光にし、ダイクロイックミラーで反射され、可視光はカメラレンズを通り、図の下方向にある可視検出器 (CCD) に再結像されるようになっている。一方、近赤外線はダイクロイックミラーを通過し、カメラレンズを通り赤外線検出器 (VIRGO) に再結



図 1.9: 可視赤外同時撮像カメラ HONIR

表 1.2: HONIR の基本仕様 [5]

| 項目 | | アーム | |
|-----------------------|----------------|--------------------------------------|--|
| | | 可視光 | 近赤外 |
| 波長域 (μm) | | 0.5-1.0 | 1.15-2.40 |
| 視野 (分角) | | 10×10 | 10×10 |
| フィルター | | (B),V,Rc,Ic,Y | Y,J,H,Ks |
| 分光 | スリット | 1".3(0.12mm),2".2(0.2mm), 6"(0.54mm) | |
| | グリズム | BK7; 300 gr/mm(Optical) | BK7; 180gr/mm(IR-short) S-FTM16; 120 gr/mm(IR-long) |
| 偏光 | プリズム | シングルウォラストンプリズム | |
| | | ダブルウォラストンプリズム (LiYF_4) | |
| 検出器 | タイプ | 完全空乏型裏面照射 CCD | HgCdTe VIRGO-2K |
| | メーカー | 浜松ホトニクス | Raytheon |
| | Format(pixels) | 2048×4096 | 2048×2048 |
| | Size(mm) | 30.72×61.44 | 40.96×40.96 |

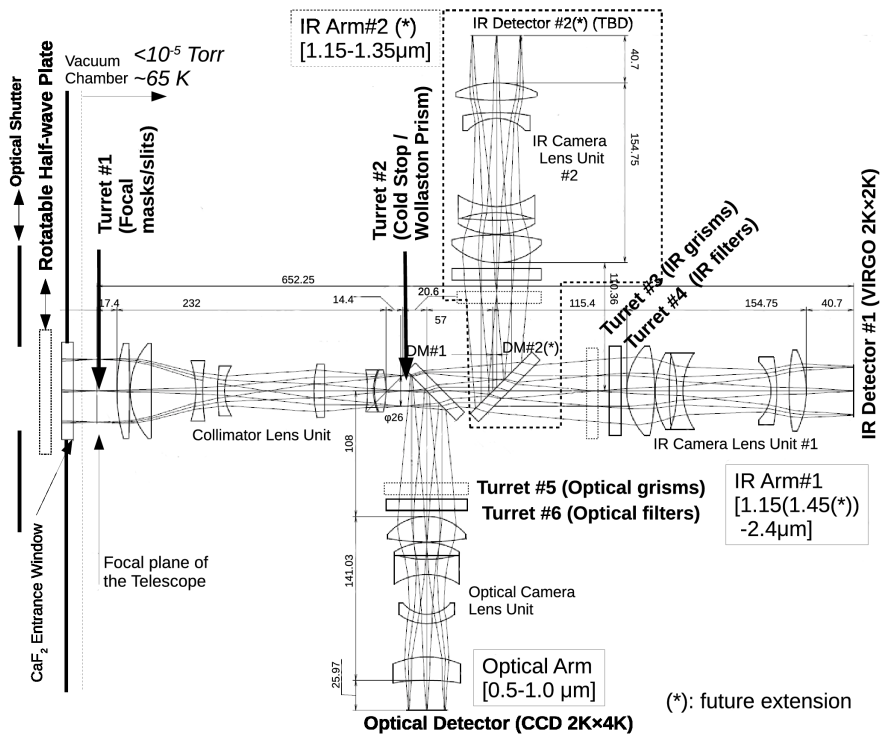


図 1.10: HONOR の光学系

像される。現在は図 1.10 中の左から二番目のダイクロイックミラーは入れておらず、可視光と近赤外線の 2 つに分けているが、将来的には近赤外線を更に短波長側、長波長側の二つに分けて、3 色 (可視光 1 色、近赤外線 2 色) 同時撮像を考えている。

半波長板は光が入射する付近 (図 1.10 の Rotatable Half-wave Plate 部分) に入る。一露出型偏光観測モードで用いるダブルウォラストンプリズムは図中の Turret #2 部分で通常の偏光観測モードで用いるシングルウォラストンなどと駆動機構を用いて交換し、観測モードの切り替えを行う。観測するバンドの切り替えに関しては各アームの平行部分にあるターレットを回転させることで異なるフィルターが入り、切り替えが行われるようになっている。

1.3.3 駆動制御系

HONIR の観測モードは半波長板、マスクホイール、瞳ホイール、可視光用グリズム、可視光用フィルター、赤外用グリズム、赤外用フィルターによって決定される。

1.3.3.1 半波長板



図 1.11: 実際に使用している半波長板

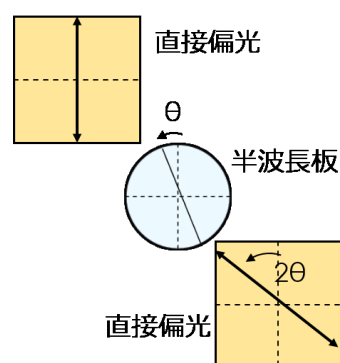


図 1.12: 半波長板のしくみ

HONIR の通常の偏光観測では半波長板を入れて偏光データを取得する。半波長板は直線偏光の偏光方位を回転させることが可能である。波長板の光学軸が入射光の偏光方位と一致している場合、偏光方位は変わらず出射する。図 1.12 のように波長板の光学軸を入射光の偏光方位から 傾けた場合、出射光の偏光方位は入射偏光方位に対し 2 傾いて出射する。つまり半波長板を回転させることにより、自由に直線偏光の偏光方位を変化させることが可能である。その際、光量は変化しないことも半波長板の特徴である。これにより、半波長板を回すことで、それ以降の装置全体を回すことと等価な操作をすることができることになる。後述するウォラストンプリズムを用いた偏光観測には 2 ないし 4 方位の情報が必要である。それが半波長板を用いることにより、装置全体を回転させずにたやすく取得可能となる。半波長板を使用しない場合、検出器を含む半波長板以降の構造全体を光学軸に対して回転する必要があり、非常に困難である。

1.3.3.2 焦点マスク

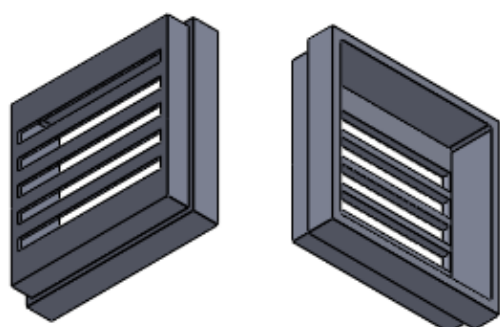


図 1.13: 偏光撮像用マスク [9]

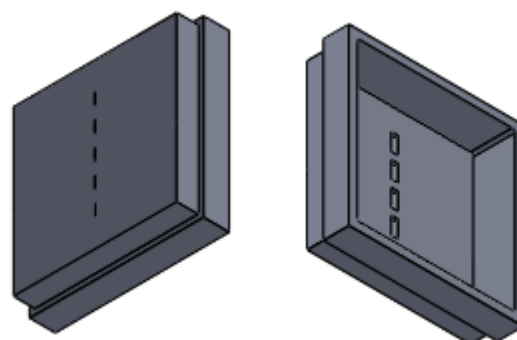


図 1.14: 偏光分光用マスク [9]

望遠鏡の焦点マスクは視野を絞るために用いるため、焦点位置に設置する。現在 HONIR で使用している焦点マスクは偏光撮像用マスク (図 1.13)、偏光分光用マスク (0.2mm 幅スリット、図 1.14)、分光用マスク (0.12mm、0.2mm、0.54mm 幅スリット、図 1.19)、格子状マスク (± 0 mm、 -11.6 mm 位置 7×7 ピンホール) があり、それぞれ観測方法によって切り替える。

図 1.13 は偏光撮像用マスクであり、シングルウォラストンプリズムと半波長板を用いた通常の偏光観測モードで用いる。シングルウォラストンプリズムは入射光を偏光成分の違う二つの光に分けるため、マスクを使用しない観測では、ふたつの画像がずれて重なったような画像が得られる。画像が重なると、画像に乗ったノイズも重なるので、偏光度の誤差が大きくなる。そこで図 1.13 のように隙間を等間隔に開けて調節することにより、重ならない画像が得られるようになる。しかし、その分映し出される面積は半分になり、その隙間に天体が入っていないと観測ができないため、位置のわかる天体の偏光観測に用いる。

図 1.14 は偏光分光用マスクであり、シングルウォラストンプリズムと半波長板を用いた偏光分光観測に用いられる。分光は光を分けて画像にするため、かなた望遠鏡では列ごとに分光をする。このマスクでは分光をするために、0.2mm 幅のスリットが入っている。また、偏光観測も同時に行うため、図 1.13 と同様に隙間を開けている。分光と偏光を同時に行うために天体の位置は通常の分光よりもさらに限られてしまう。

1.3.3.3 フィルター

フィルターは観測する波長を制限するものであり、可視光のフィルターの透過曲線は図 1.15、近赤外線フィルターの透過曲線は図 1.16 に示してある。これらの値は HONIR に搭載されているフィルターの実測値である。グラフの縦軸は透過率 (%) であり、横軸が波長 (nm) である。それぞれのフィルターターレットを回転させることによりフィルターを選択する。

可視光、赤外線観測で用いられる典型的な波長帯は表 1.3 で示す。なお、これらの値は Johnson-Cousins system の各バンドの波長特性を示している。

表 1.3: バンドごとの波長帯

| 波長帯名称 | | 中心波長 (nm) | 波長幅 (nm) |
|-------|----|-----------|----------|
| | V | 550.5 | 82.7 |
| 可視光 | R | 658.8 | 156.8 |
| | I | 806.0 | 154.2 |
| | J | 1215 | 260 |
| 近赤外線 | H | 1654 | 290 |
| | Ks | 2157 | 320 |

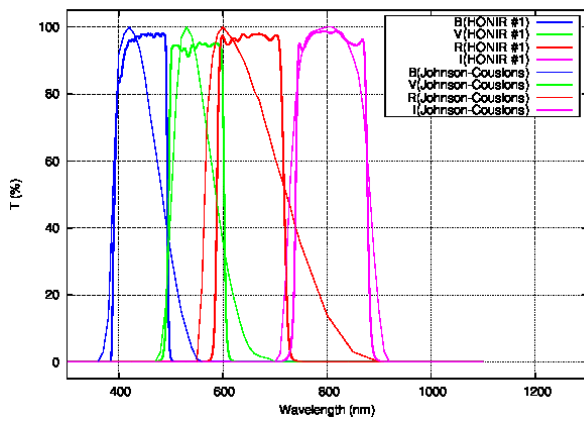


図 1.15: フィルター透過曲線 (可視光)[9]

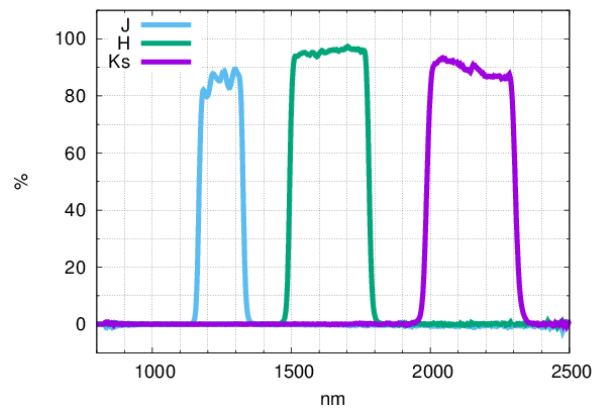


図 1.16: フィルター透過曲線 (近赤外)[9]

1.3.3.4 プリズム

プリズムには、波長による屈折率の違いを利用して光を屈折させて分光するもの、偏光によって光の進む方向を分離するものがある。現在は、撮像のための素通しの他に、偏光撮像のためのシングルウォラストンプリズム、ダブルウォラストンプリズム、分光撮像のためのグリズムが選択できる。

シングルウォラストンプリズムとダブルウォラストンプリズム

ウォラストンプリズムとは複屈折性をもつプリズムを複数個、光学軸をずらして接着して作られたものである。HONIR で用いているシングルウォラストンプリズムとダブルウォラストンプリズムどちらも $LiYF_4$ 製である。

シングルウォラストンプリズム (図 1.17) は2つのプリズムの光軸を直交する状態で接着しており、入射光線は常光線と異常光線という互いの偏光面が 90° 異なる光線となって出射する。HONIR では通常の偏光観測に用いられる。

ダブルウォラストンプリズム (図 1.18) は2つのウォラストンプリズムの光学軸を 45° ずらして接着して作られたものである。接合部の中心のまわりに入射瞳像を形成するように光を入射することにより 0° 、 90° 、 45° 、 135° の直線偏光成分に分離することが可能である。このプリズムを用いることにより、1回の露出で偏光撮像データが取得できる。

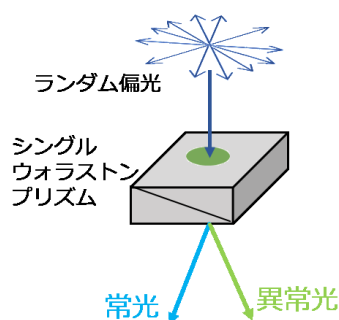


図 1.17: シングルウォラストンプリズム

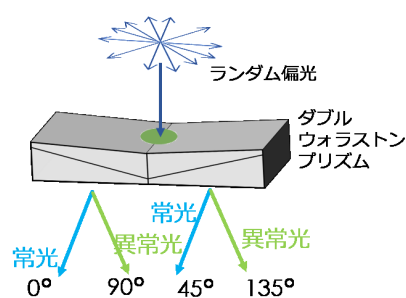


図 1.18: ダブルウォラストンプリズム

グリズム

グリズムとは回折格子とプリズムを組み合わせた分散素子である。分光する際に用いられ、波長分解能 ($R=\lambda/\delta\lambda$) は $1''.3$ のマスクを用いた場合、可視用グリズムは可視光 V バンドにおいて $R\sim 440$ 、赤外グリズム (IR-short) は近赤外線 J バンドにおいて $R\sim 630$ 、赤外グリズム (IR-long) は近赤外線 J バンドにおいて $R\sim 570$ 、Ks バンドにおいては $R\sim 600$ である [5]。図 1.19 に分光用のマスクとともに可視光用のグリズム、近赤外線用のグリズムを示している。

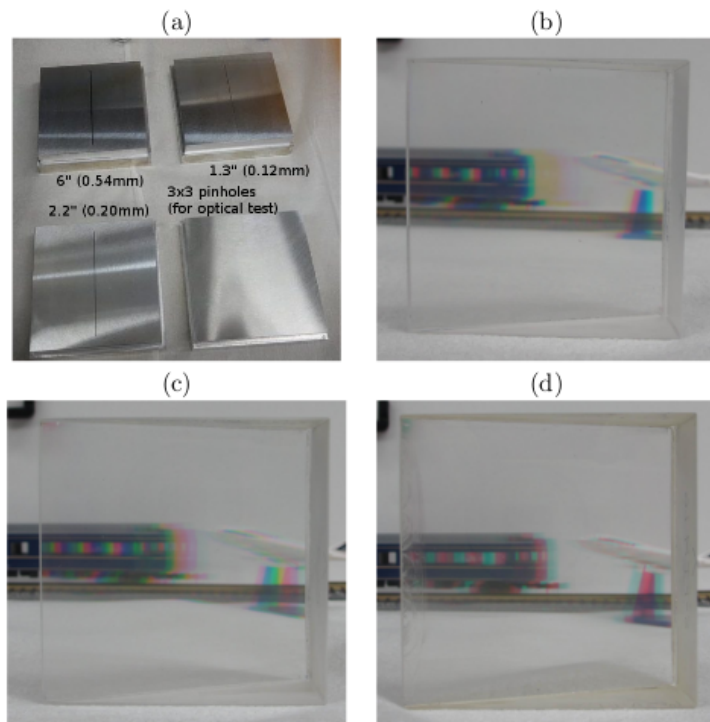


図 1.19: (a) スリットマスク (分光用マスク) (b) 可視グリズム (c) 赤外グリズム (IR-short) (d) 赤外グリズム (IR-long)[5]

1.3.4 ワイヤーグリッド

偏光光学素子のひとつにワイヤーグリッドがある。ワイヤーグリッドは入射した光をノミナルに 100% 偏光させるフィルターである。HONIR ではキャリブレーション観測時に、シャッター機構の手前にワイヤーグリッドを取り付け天体からの光を偏光して HONIR 内に入射して用いる。図 1.20 が現在 HONIR で使用しているワイヤーグリッドである。これは HONIR 用に作られたものではないので視野の範囲が狭く、取り付けの際にはワイヤーグリッドがシャッター窓の中心に来るようにする必要がある。シャッター窓は図 1.21 の HONIR の上の際間にある円状の窓のすぐ下にある。シャッター窓の周りにはちょうどワイヤーグリッドが中心に来るようにカプトンテープで印が付けられているので、ワイヤーグリッドのフィルターがついた板をあわせて養生テープで固定する。本研究ではこれを用いて偏光観測の消偏光を求める。

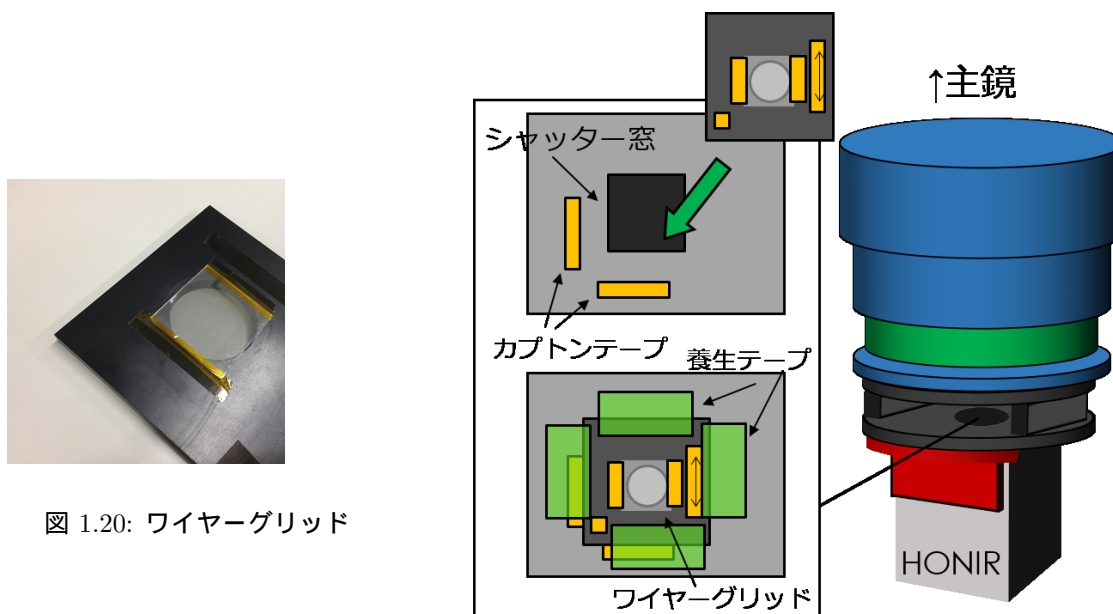


図 1.20: ワイヤーグリッド

図 1.21: 現在の HONIR におけるワイヤーグリッドの取り付け方

1.4 $LiYF_4$ 製ウェッジ付きダブルウォラストンプリズム

本研究のテーマとなっている一露出型偏光観測は、上述のウェッジ付きダブルウォラストンプリズムを 4 つの光線が分離するように工夫したものをを用いることで可能となる。ダブルウォラストンプリズムは先程にも述べたが 2 つのウォラストンプリズムの光学軸を 45° ずらして接合したもので、中心に光を入射することにより 0° 、 90° 、 45° 、 135° の直線偏光成分に分離される。入射する面が平面ではなくウェッジをつけることによって光が分離できる構造となっている。一露出型偏光観測は可視光観測が可能な HOWPol において既に使用されているが、HONIR で使用するダブルウォラストンプリズムと HOWPol で使用するものは設計なども少し異なっている。図 1.22 は HONIR で使用しているウェッジ付きダブルウォラストンプリズムである。HONIR に取り付ける際は図 1.23 のように専用のケースに入れて固定している。図 1.24

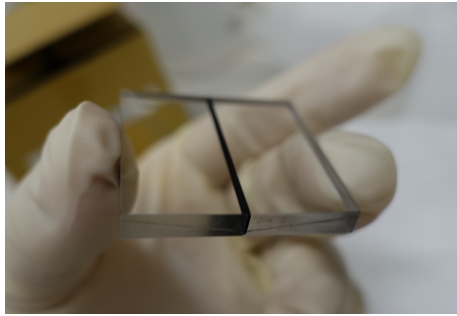


図 1.22: ウェッジ付きダブルウォラストンプリズム

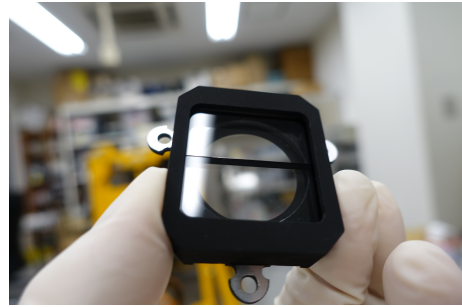


図 1.23: ウェッジ付きダブルウォラストンプリズム (取り付け時)

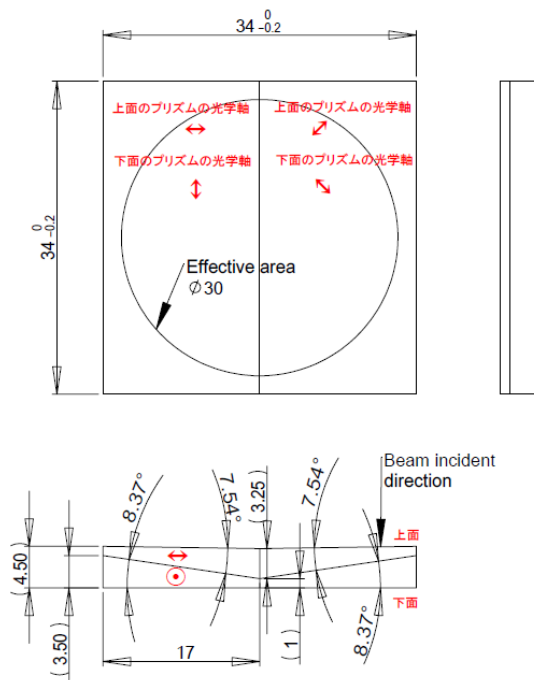


図 1.24: ウェッジ付きダブルウォラストンプリズム

には細かい寸法などが記してあり、図中の下面のプリズムの傾きが 8.37° に対して上面のプリズムの傾きが 7.54° であることからウェッジがついていることがわかる。

1.5 本研究の目的

かなた望遠鏡ではガンマ線バーストの残光の偏光観測を主たる研究テーマのひとつとしている。偏光観測により、その発光領域の磁場構造の推定が可能となる。ガンマ線バーストの残光は時間変化が速く、4回の露出が必要な通常の偏光観測では同時性のある偏光測定は困難である。現在は、可視光での一露出型偏光モードの自動観測をナスミス焦点に取り付けられた HOWPol において行なっているが、可視近赤外線同時の一露出型偏光モードの実現はまだであった。

本研究の目的は、可視近赤外線同時観測が可能な HONIR において、最近導入したウェッジ付きダブルウォラストンプリズムを用いた偏光観測を行い、その性能を評価することである。無偏光標準星を観測することで常光と異常光の透過効率比 (k_e/k_o) の安定性、強偏光標準星の観測から偏光方位角原点が得られる。また、ワイヤーグリッド (入射した光を 100% 偏光にする) を使用した観測からそれぞれの偏光観測の偏光能率を求め、安定性を評価すると共に、推奨されるキャリブレーション観測方法を提案する。今後、ガンマ線バーストの自動観測を HONIR で行い、可視近赤外線同時偏光観測データの取得を目指す。

第2章 HONIRの一露出型偏光観測モード

HONIRの一露出型偏光観測では、ウェッジ付きダブルウォラストンプリズムを用いる。一つの光を4つに分けるので4つのデータが少しずつずれて重なったようなデータが得られる。

2.1 一露出型偏光観測法

以下では、通常の偏光観測モードと一露出型偏光観測モードのストークスパラメータの導出を考える。

2.1.1 通常の偏光観測モードのストークスパラメータの導出

HONIRでの通常の偏光観測では半波長板とシングルウォラストンプリズムを用いた方法で行なっている。これについてストークスパラメータの導出を行う。

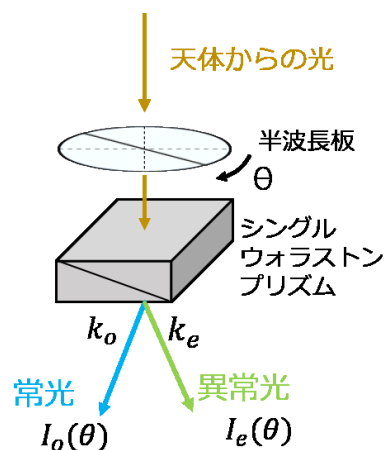


図 2.1: 通常の偏光観測モード

1つのデータを得るために半波長板の方位角が 0° 、 45° 、 22.5° 、 67.5° となる向きに計4回、回転させる。図 2.1 は天体からの光が大気の影響を受けた後、入射する様子を示している。

光が大気に吸収される量は時間に依存する関数となるので $\xi(t)$ とおく。 θ 回転した半波長板を通過した光は、プリズムによりそれぞれある効率 k_o 、 k_e で減光して常光 (図では $I_o(\theta)$) と異常光 (図では $I_e(\theta)$) に

分けられる。それぞれ装置上で検出される強度を $I_o(\theta)$ と $I_e(\theta)$ で表すと以下ようになる (付録 6.1.1)。

$$I_o(\theta) = \frac{I}{2} \left\{ 1 + \frac{Q}{I} \cos 4\theta + \frac{U}{I} \sin 4\theta \right\} k_o \xi(t) \quad (2.1)$$

$$I_e(\theta) = \frac{I}{2} \left\{ 1 - \frac{Q}{I} \cos 4\theta - \frac{U}{I} \sin 4\theta \right\} k_e \xi(t) \quad (2.2)$$

$\theta=0^\circ$ 、 45° 、 22.5° 、 67.5° の強度は式 2.1、2.2 にそれぞれ代入して、以下ようになる。

$$I_o(0^\circ) = \frac{I}{2} \left\{ 1 + \frac{Q}{I} \right\} k_o \xi(t_{0^\circ}) \quad (2.3)$$

$$I_e(0^\circ) = \frac{I}{2} \left\{ 1 - \frac{Q}{I} \right\} k_e \xi(t_{0^\circ}) \quad (2.4)$$

$$I_o(45^\circ) = \frac{I}{2} \left\{ 1 - \frac{Q}{I} \right\} k_o \xi(t_{45^\circ}) \quad (2.5)$$

$$I_e(45^\circ) = \frac{I}{2} \left\{ 1 + \frac{Q}{I} \right\} k_e \xi(t_{45^\circ}) \quad (2.6)$$

$$I_o(22.5^\circ) = \frac{I}{2} \left\{ 1 + \frac{U}{I} \right\} k_o \xi(t_{22.5^\circ}) \quad (2.7)$$

$$I_e(22.5^\circ) = \frac{I}{2} \left\{ 1 - \frac{U}{I} \right\} k_e \xi(t_{22.5^\circ}) \quad (2.8)$$

$$I_o(67.5^\circ) = \frac{I}{2} \left\{ 1 - \frac{U}{I} \right\} k_o \xi(t_{67.5^\circ}) \quad (2.9)$$

$$I_e(67.5^\circ) = \frac{I}{2} \left\{ 1 + \frac{U}{I} \right\} k_e \xi(t_{67.5^\circ}) \quad (2.10)$$

式 2.4 から式 2.3 を割ることで大気による吸収量 ξ を消去できる。他も同様に計算していく。

$$\frac{I_e(0^\circ)}{I_o(0^\circ)} = \left(\frac{1 - Q/I}{1 + Q/I} \right) \frac{k_e}{k_o} \quad (2.11)$$

$$\frac{I_e(45^\circ)}{I_o(45^\circ)} = \left(\frac{1 + Q/I}{1 - Q/I} \right) \frac{k_e}{k_o} \quad (2.12)$$

$$\frac{I_e(22.5^\circ)}{I_o(22.5^\circ)} = \left(\frac{1 - U/I}{1 + U/I} \right) \frac{k_e}{k_o} \quad (2.13)$$

$$\frac{I_e(67.5^\circ)}{I_o(67.5^\circ)} = \left(\frac{1 + U/I}{1 - U/I} \right) \frac{k_e}{k_o} \quad (2.14)$$

式 2.11 から式 2.12 を割り、 $\frac{k_e}{k_o}$ を消去して、 $\frac{Q}{I}$ について解くことができる。 $\frac{U}{I}$ も同様にして解くと、

$$I = \sum_{\theta} (I_o(\theta) + I_e(\theta)) \quad (2.15)$$

$$\frac{Q}{I} = \frac{1 - a_1}{1 + a_1} \quad \left(a_1 = \sqrt{\frac{I_e(0^\circ)/I_o(45^\circ)}{I_o(0^\circ)/I_e(45^\circ)}} \right) \quad (2.16)$$

$$\frac{U}{I} = \frac{1 - a_2}{1 + a_2} \quad \left(a_2 = \sqrt{\frac{I_e(22.5^\circ)/I_o(67.5^\circ)}{I_o(22.5^\circ)/I_e(67.5^\circ)}} \right) \quad (2.17)$$

となる。つまりストークスパラメータ Q 、 U は効率 k_o 、 k_e や大気による吸収量 ξ に依存しない量であり、装置や天候の変化に強いという利点がある。

2.1.2 一露出型偏光観測モードのストークスパラメータの導出

一露出型偏光観測モードのストークスパラメータを導出する。

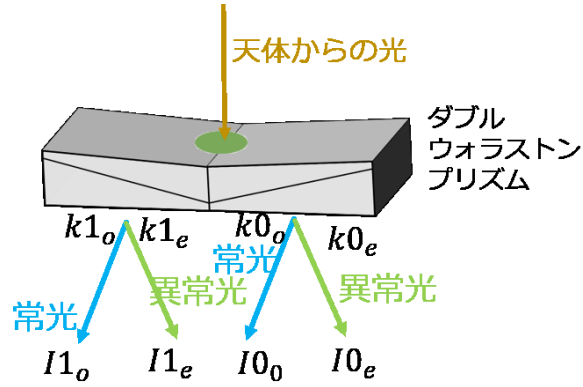


図 2.2: 一露出型偏光観測モード

一露出型偏光観測の概念図を図 2.2 に示している。通常の半波長板を用いる偏光観測と同じように、大気からの影響 $\xi(t)$ を受けて入射する。光はプリズムによる効率 k_{1o} 、 k_{1e} 、 k_{0o} 、 k_{0e} で減光して、強度が I_{1o} 、 I_{1e} 、 I_{0o} 、 I_{0e} となる 4 つの光に分けられる。

光の強度は以下のように表される。

$$I_{1o} = I(0^\circ)k_{1o}\xi(t) \quad (2.18)$$

$$I_{1e} = I(90^\circ)k_{1e}\xi(t) \quad (2.19)$$

$$I_{0o} = I(45^\circ)k_{0o}\xi(t) \quad (2.20)$$

$$I_{0e} = I(135^\circ)k_{0e}\xi(t) \quad (2.21)$$

一方で Q と U は、

$$\frac{Q}{I} = \frac{I(0^\circ) - I(90^\circ)}{I(0^\circ) + I(90^\circ)} \quad (2.22)$$

$$\frac{U}{I} = \frac{I(45^\circ) - I(135^\circ)}{I(45^\circ) + I(135^\circ)} \quad (2.23)$$

と計算できる (付録 6.1.2)。 $\xi(t)$ は共通のため、以上の式より、

$$I = I_{1o} + I_{1e} + I_{0o} + I_{0e} \quad (2.24)$$

$$\frac{Q}{I} = \frac{I_{1o} \left(\frac{k_{1e}}{k_{1o}} \right) - I_{1e}}{I_{1o} \left(\frac{k_{1e}}{k_{1o}} \right) + I_{1e}} \quad (2.25)$$

$$\frac{U}{I} = \frac{I_{0o} \left(\frac{k_{0e}}{k_{0o}} \right) - I_{0e}}{I_{0o} \left(\frac{k_{0e}}{k_{0o}} \right) + I_{0e}} \quad (2.26)$$

となる。

また、プリズムの効率に関する値 k_e 、 k_o は式 2.11 と式 2.12 から $\frac{Q}{I}$ を消去して、式 2.13 と式 2.14 から

$\frac{U}{I}$ を消去することによって、

$$\frac{I_e(0^\circ) I_e(45^\circ) I_e(22.5^\circ) I_e(67.5^\circ)}{I_o(0^\circ) I_o(45^\circ) I_o(22.5^\circ) I_o(67.5^\circ)} = \left(\frac{k_e}{k_o}\right)^4 \quad (2.27)$$

$$\frac{k_e}{k_o} = \left(\frac{I_e(0^\circ) I_e(45^\circ) I_e(22.5^\circ) I_e(67.5^\circ)}{I_o(0^\circ) I_o(45^\circ) I_o(22.5^\circ) I_o(67.5^\circ)}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.28)$$

となり、 $\frac{k_e}{k_o}$ が求められる。

つまり、 $\frac{k_{1e}}{k_{1o}}$ 、 $\frac{k_{1e}}{k_{1o}}$ には半波長板とダブルウォラストンプリズムを用いて導出した値を用いれば良い。また、 $\frac{k_e}{k_o}$ の値は観測ごとにばらつき、一定ではないことが知られており、これが一露出型プリズムの安定性に関わる値で、その安定性次第では器械偏光の誤差の主要因となる。

2.1.3 半波長板回転時の偏光観測

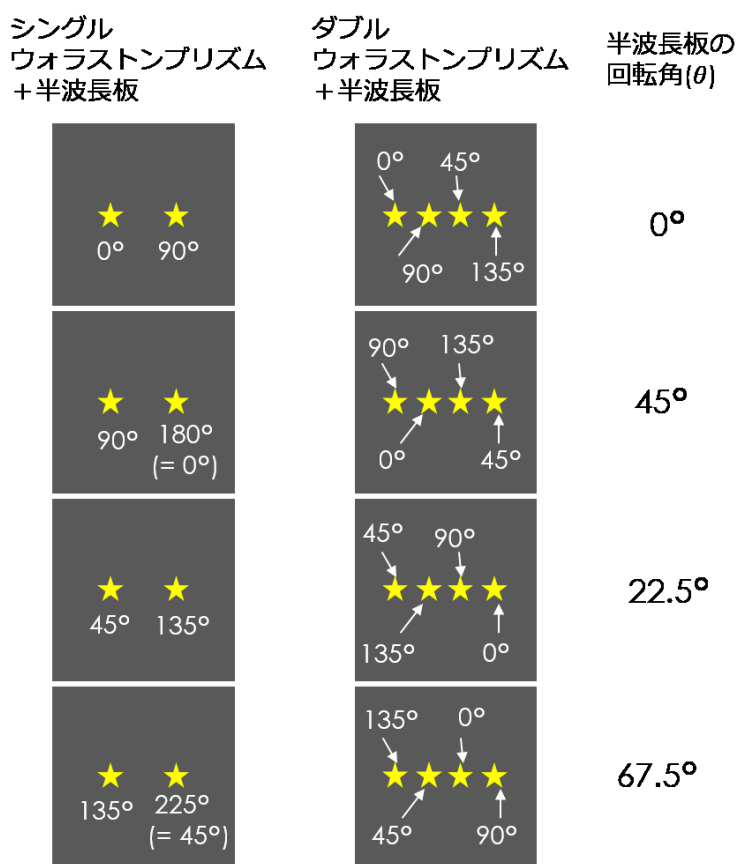


図 2.3: 半波長板回転時の偏光観測における画像

図 2.3 はシングルウォラストンプリズムと半波長板を用いた時、ダブルウォラストンプリズムと半波長板を用いた時、それぞれの偏光成分の分けられ方について示している。半波長板の回転角は 0°、45°、22.5°、67.5° と変化させていくのでその時のシングルウォラストンプリズムを通した光の様子を左側に、ダブル

ルウォラストンプリズムを通した光を右側に示した。黒い四角一つ一つは画像の一枚一枚であり、星は天体を表す。シングルウォラストンプリズムは天体の光を2つに分け、ダブルウォラストンプリズムは4つに分ける。天体の近くに示した角度は、半波長板の回転角が 0° のときにシングルウォラストンプリズムを通した光が 0° と 90° 、ダブルウォラストンプリズムを通した光が 0° と 90° と 45° と 135° の偏光成分に分けられると仮定した時、それぞれの偏光成分で分けられる角度を示している。

図2.3から、ダブルウォラストンプリズムと半波長で偏光観測したものから得られる偏光データは、シングルウォラストンプリズムと半波長で偏光観測したものの2倍の量であることが判る。ダブルウォラストンプリズムの画像に注目すると、左二つの天体については4回半波長板を回したデータからひとつの偏光データが得られ、右二つの天体からも4回半波長板を回すごとにひとつの偏光データが得られるので、4回半波長板を回せば、合計2つの偏光データが得られる。ただしこのときに左側、右側の偏光方位角は 45° のズレがあることに注意する必要がある。

また、ダブルウォラストンプリズムを通した像の右側と左側の光量は等しくなるように設置しているのであれば、例えば半波長板の方位角が 0° 、 22.5° の2回転だけでも偏光データがひとつ得られる。しかし、装置の特性上完全に左右の光量が等しいという事はないので、この偏光観測を行う際には左右の光量の比を考慮して、更に補正を加える必要がある。

2.1.4 偏光観測法の比較

上で述べたように HONIR での偏光観測は通常の偏光観測モードと一露出型偏光観測モードがあり、目的によって使い分ける必要がある。

通常の偏光観測モードは1回のデータを得るために4方位の情報が必要となるため、4回の露出が必要となる。4回露出する間に変動するような時間変化の早い天体には向いていないが一般的な偏光観測において十分な精度が期待できる。

一露出型偏光観測モードは一回の露出で偏光観測が可能である。光量がシングルウォラストンの半分になるため1回あたりの露出時間は増えるが、ガンマ線バーストの残光など時間変化の早いものに対しては有効である。

精度に関しては、通常の偏光観測モードは、画像に対して天体の像の位置が4回回転させる際に、ほとんど変化がないので十分精度の良い測定ができる。一方、ダブルウォラストンプリズムを用いる一露出型偏光観測は一枚の画像で偏光観測を行うため、それぞれの像がすこしずつずれたところに映る。装置の特性上、像がずれることにより、精度は半波長板を回転させる偏光観測よりも少しだけ悪くなることが予想されるため、時間変化の早いものでない場合は通常の偏光観測が推奨される。

2.2 必要なキャリブレーション

2.2.1 器械偏光

器械偏光とは望遠鏡や装置内部で生成される偏光のことである。カセグレン焦点中心では反射が軸対称であるので偏光が打ち消されて器械偏光は典型的に0.3%以下となる。一方、HOWPolなどが取り付けられたナスミス焦点では第3鏡での反射が軸対称ではないため視野中心で3-4%の器械偏光が生じる [1]。器械偏光は観測する波長によっても異なる可能性があるため、無偏光標準星 ($Q=U=0$) を用いて評価する。

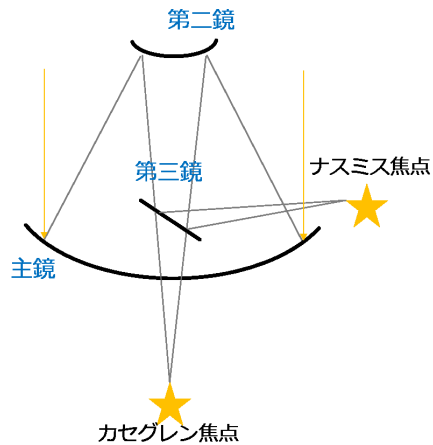


図 2.4: カセグレン焦点とナスミス焦点

2.2.2 消偏光効果

消偏光とは装置の偏光能率のことである。また、波長ごとにも異なることから、観測するモードにより補正する必要がある。ワイヤーグリッド偏光フィルターを通した光 (100%偏光の光) の観測から評価する。

2.2.3 方位角原点

天球座標系に対して望遠鏡の方位角原点を求める必要がある。方位角原点は半波長板を用いた観測の場合、波長によって異なるためそのオフセット角を一様に補正してやる必要がある。また、観測モードによっても異なるため、それぞれで評価する。天球上の偏光方位角は、既知の強偏光標準星を用いてオフセット角を求めることで決定する。

第3章 観測とデータリダクション

3.1 調査項目

一露出型の偏光観測モードのキャリブレーションを行うために以下の点を調査する。また、一露出型偏光観測と通常の偏光観測の値をを比較することで評価する。

器械偏光の安定性

一露出型の偏光観測モードの器械偏光の変化について、ダブルウォラストンプリズムと半波長板を用いた観測において常光と異常光の透過効率比 (k_e/k_o) を日にちや無偏光標準星を変えて求め、その変化を見て k_e/k_o の値のとり方による一露出型偏光観測への影響を考え、評価する。また、求めた k_e/k_o を用いて一露出型偏光観測モードで得られる器械偏光の値の変化を調査する。

偏光能率の波長依存性

本来の偏光度が装置を通した後どのくらいの偏光度となるのかをあらわす偏光能率について、透過光がノミナルには完全直線偏光となるワイヤーグリッドを挿入した観測から求める。100%偏光で入射した光を各バンドで偏光観測し、それぞれの観測モードや観測する波長において偏光能率を計算する。

偏光方位角原点の波長依存性

アクロマティックな (つまり広帯域対応の) 半波長板の光学軸は波長依存性があり、それによって生じる偏光方位角原点の波長によるずれをワイヤーグリッドの観測において求める。100%偏光で入射した光を半波長板を用いた偏光観測をし、波長による変化を調査する。

天球上での偏光方位角原点

天球座標上において偏光方位角の基準となる偏光方位角原点を求める。すでに偏光方位角がわかっている強偏光標準星の観測から評価する。

視野内依存性

視野中心から外れた天体の偏光データの変化について、天体の位置を視野中心からずらした偏光観測を行い、偏光度、偏光方位角の変化について調べる。

3.2 観測

3.2.1 観測方法

観測方法は、シングルウォラストンプリズムを用いる通常の偏光観測モード (図 3.1)、ダブルウォラストンプリズムを用いる一露出型偏光観測モード (図 3.2)、ダブルウォラストンプリズムと半波長板を用いる観測モード (図 3.3) の 3 パターンを 1 セットとして観測を行うものとする。

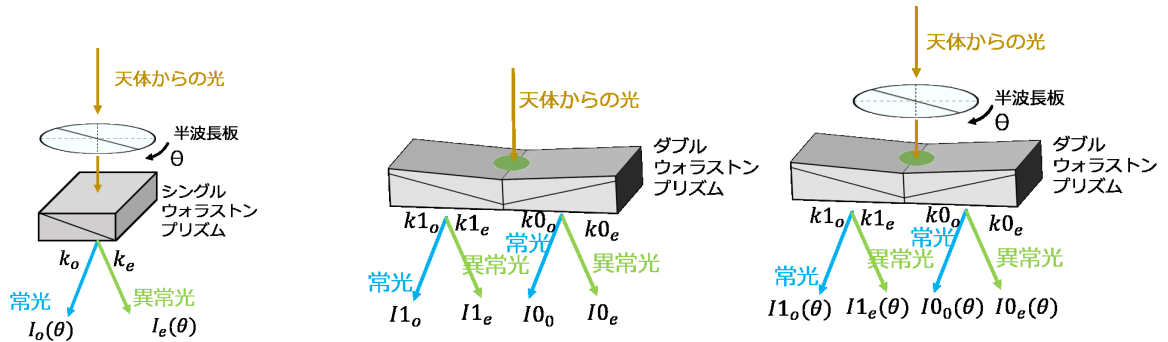


図 3.1: 通常の偏光観測モード 図 3.2: 一露出型偏光観測モード 図 3.3: ダブルウォラストンプリズムを用いた通常の偏光観測モード

| 観測モード | 近赤外線Hバンド | | 可視光Rバンド | |
|--------|----------|------|---------|------|
| | 通常 | 一露出型 | 通常 | 一露出型 |
| 取得画像 | | | | |
| 方位角補正後 | | | | |

図 3.4: 取得画像と方向補正後画像 (通常:① $I_o(\theta)$ ② $I_e(\theta)$ 一露出型:① I_{1o} ② I_{1e} ③ I_{0o} ④ I_{0e})

図 3.4 は通常の偏光観測モード、一露出型偏光観測モードで得られる画像を示している。HONIR で取得

し、一時処理をした画像は上の段の取得画像であり、そのときの画像の方向は、近赤外線と可視光とで異なり、それぞれの画像の右下に方向を示している。下の段は画像の上が北、左が東となるように回転または反転させたものである。図 3.4 以外の HONIR の画像は基本的に方向を補正したものを使用している。偏光観測では、常光と異常光のとり方により偏光方位角が異なる。本研究では、近赤外線は取得画像の上から常光、異常光（一露出モードの時は I_{1o} 、 I_{1e} 、 I_{0o} 、 I_{1e} の順）とし、可視光は取得画像の左から常光、異常光としている。

3.2.2 観測天体

無偏光標準星（偏光が見られない天体、 $Q=U=0$ ）、強偏光標準星（既に偏光度、偏光方位角が知られているもの）を中心に観測する。

本研究で用いた天体は表 3.1 に示す。

表 3.1: 観測天体

| 分類 | 天体名 | 赤経 (R.A.) | 赤緯 (Dec.) | 等級 | Sp. | 偏光度 (%) | 偏光方位角 (°) | 観測日 |
|----|-------------------|-------------|-------------|------|------|-----------|-----------|----------------|
| UP | HD14069[14] | 02:16:45.2 | +07:41:11 | 9.0 | A0 | 0.02±0.02 | - | 11/9,12/2,1/11 |
| | HD12021[14] | 01:57:56.1 | -02:05:58 | 8.9 | B7 | 0.08±0.02 | - | 12/2 |
| | HD212311[14] | 22:21:58.6 | +56:31:53 | 8.1 | A0V | 0.03±0.02 | - | 12/2 |
| | HD94851[15] | 10:56:44.2 | -20:39:52 | 9.2 | B9 | 0.06±0.02 | - | 2/21 |
| | HD154892[15] | 17:07:41.4 | +15:12:38 | 8.0 | F8V | 0.05±0.03 | - | 4/27 |
| SP | BD+64d106[14] | 00:57:36.07 | +64:51:27 | 10.3 | B1V | 5.69±0.04 | 96.6±0.2 | 1/11 |
| | HD251204[15] | 06:05:05.7 | +23:23:39 | 10.3 | B0IV | 4.04±0.07 | 147 | 1/19,25,4/13 |
| | HD155197[15] | 17:10:15.6 | -04:50:03 | 9.2 | A0 | 4.38±0.03 | 103.2 | 2/21,4/13 |
| | TYC1926-873-1[16] | 08:01:17.33 | +22:59:20.9 | 11.2 | M0 | - | - | 1/25 |
| | BD+25 2272[16] | 10:37:22.55 | +24:35:36.4 | 9.8 | G5 | - | - | 1/25 |

なお表 3.1 において UP(Unpolarized Standard Stars) は無偏光標準星、SP(Strongly Polarized Standard Stars) は強偏光標準星、何も記していないものはワイヤグリッドで用いた標準星ではない天体である。また、等級や偏光方位角は可視光の V バンドで観測したものである。Sp.(スペクトルタイプ) はその天体のスペクトルによって分類されたものであり、例えば HD212311 であれば HR 図 (図 3.5) における A0 型 (A 型の中でも最も表面温度が高いもの、0-9 の 10 段階で表す) の主系列星である。

図 3.6-3.8 の中心にある天体が今回観測した天体で、The Digitized Sky Survey[11] からのデータであり、15 分角視野内の星が写っている撮像画像である。

3.3 データリダクション

天体の観測を行い、その画像を取得し解析を行うが、そのままのデータ (生画像) では装置やその日の環境の影響を受けているため、正しく解析できない。そこで取得した画像だけでなく、補正に必要なデータも取得し、画像に対して適切な処理を行う必要がある。

データリダクションではデータ取得、一次処理、開口測光を行う。

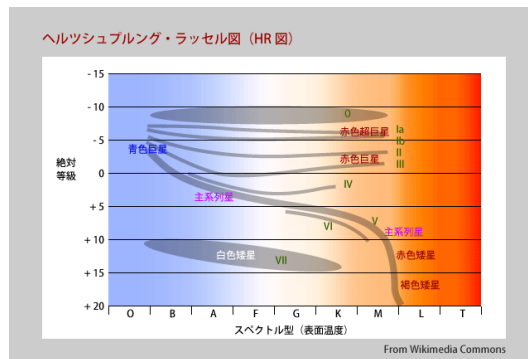


図 3.5: 恒星の HR 図 [10]



図 3.6: HD14069



図 3.7: HD12021



図 3.8: HD212311



図 3.9: HD94851



図 3.10: HD154892



図 3.11: BD+64d106



図 3.12: HD251204



図 3.13: HD155197



図 3.14: TYC1926-873-1



図 3.15: BD+25 2272

今回の画像解析にはすべて「IRAF」という、NOAO(アメリカ国立光学天文台)で作成された汎用の画像解析ソフトウェアを用いた。

3.3.1 データ取得

取得したデータの他に必要なものは、可視光ではバイアス画像、フラット画像を作成するためデータ、近赤外線では、ダーク画像、フラット画像を取得するためのデータである。

バイアス画像

バイアスとは読み出すときにかける電圧によって生じたカウントのことである。バイアス画像は、毎回観測後にシャッターを閉じて取得した複数のデータから1枚を作成する。その日のバイアスは一定と考えており、観測画像はモードにかかわらず同じものを使用する。

ダーク画像

ダークとは検出器を何もせずに放置した時に読み取る値である。検出器は、光子が光電子に変換された後、その電荷を電圧として読み取っている。しかし、電子は勝手に励起することがあり、その値も検出器が読み取ってしまう。可視光はエネルギーが近赤外線よりも大きいため、電子は検出されるレベルまで励起することはほとんどないが、近赤外線の検出器が電子を検出するレベルにまで励起することは稀ではない。そのため可視光でのダーク引きは、ほとんど変化がないため行わず、近赤外線でのみ行なっている。また、ダークは露出時間に比例しているため、毎回観測後に近赤外で観測した露出時間のダークをそれぞれ取得する必要がある。

フラット画像

フラット割りはモードによってピクセルの感度を補正するために行う。ピクセルによって同じ光を受け取っても違うカウント数を示してしまうので、補正する必要がある。フラット画像は観測モードによって異なるので毎回取得することは困難である。そのため、フラット画像は観測データに近い日に取得したデータ使用し、バイアス引きが済んだ画像をそのフラット画像で割って感度のムラを補正する。フラット画像のデータは、かなた望遠鏡ではドームの一部に固定してあるフラットスクリーンに望遠鏡を向け、ハロゲンランプを使ってスクリーンをなるべく一様に照らし、その「ピンぼけ」の像を近似的なフラット光源とすることで取得を行なっている。

3.3.2 一次処理

HONIRで偏光観測した後に得られるデータ(生画像)は、図3.16のように様々なノイズが乗っているためそのまま解析することはできない。そこで生画像に対して「一次処理」を行い、ノイズをなくしていく。可視光と近赤外線の一次処理は少し異なるが、大まかな流れは以下のとおりである。

1. オーバースキャン領域を引く

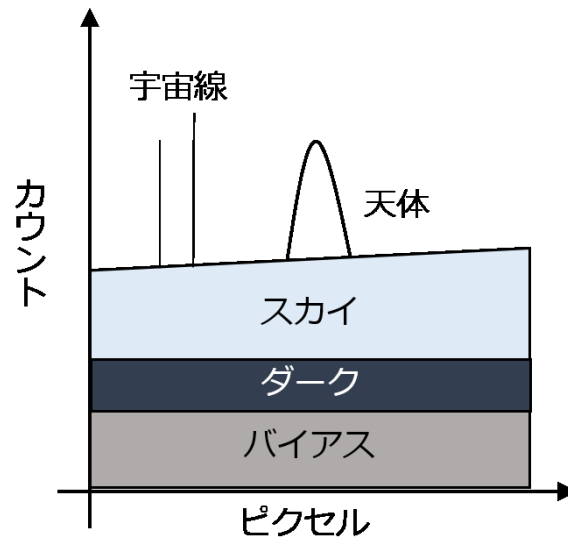


図 3.16: 生画像にのるノイズ

2. バイアスを引く (近赤外線の場合はダーク (ダーク+バイアス) を引く)
3. フラットで割る
4. バッドピクセル補正 (近赤外線のみ)

それぞれの詳しい手順は以下で画像を示しながら説明していく。いずれも 12 月 2 日の HD14069 の一露出型偏光観測の画像を使用している。

可視光

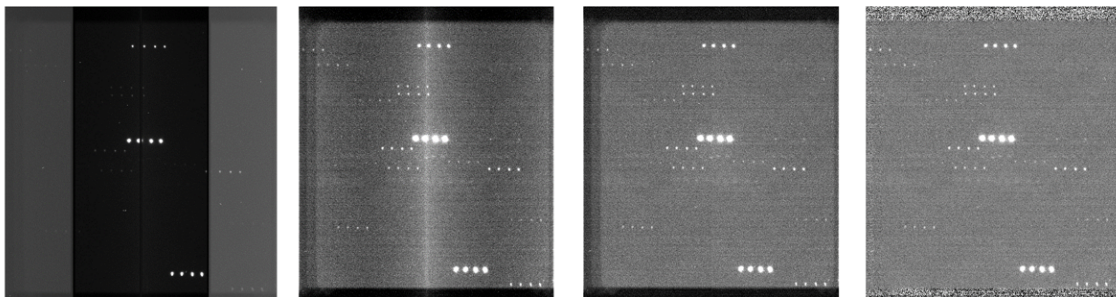


図 3.17: 可視光の一次処理の流れ (左から (1) 生画像、(2) オーバースキャン領域引き画像、(3) バイアス引き画像、(4) フラット割り画像)

生画像 (図 3.17(1)) にはオーバースキャン領域と呼ばれる黒い細い帯状の領域がある。その領域はオーバースキャン領域引きを行うことにより、切れ目の無いようにつなぎ合わされるので、オーバースキャン領

域に天体がかぶってしまっても特に問題はない。オーバースキャン領域は検出器から電荷を読み出す際に追加で余分に読み出された部分であり、これを引くことによって画像取得時の検出器のバイアス値(短期間変動)を引くこととなる。オーバースキャン領域は検出器ごとに異なるため、それぞれ違う操作を行う必要がある。HONIRの可視光画像では「IRAF」用に書かれた「hnttrimccd」を使うことでオーバースキャン領域を引くことができる。その後、バイアス画像(ピクセルごとのバイアス、長期間変動)のカウンタを引くことによりバイアス引きを行い、フラット画像で割る(図 3.17(4))ことでピクセルの感度を補正する。

近赤外線

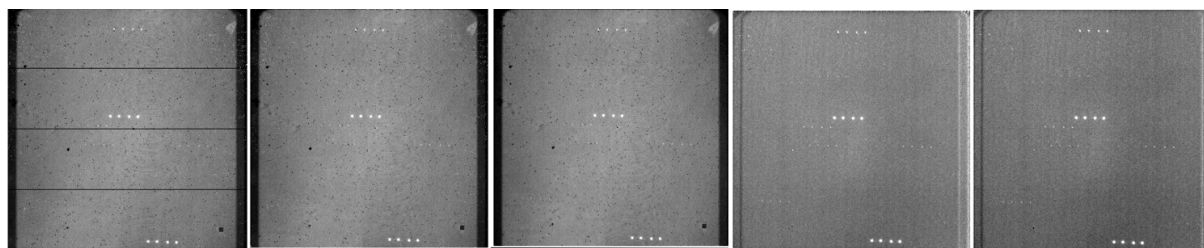


図 3.18: 近赤外線の一次処理の流れ(左から (1) 生画像、(2) オーバースキャン領域引き画像、(3) ダーク引き画像、(4) フラット割り画像、(5) バッドピクセル補正済み画像)

近赤外の画像は HONIR の特性上、可視光と同時に観測した時に可視光よりも 15 秒は露出時間が短くなってしまいうので可視光画像の方が明るくなりやすい。標準星は比較的明るい天体が多いので、可視光のカウントが検出器のリニアリティが保証されているカウント範囲よりも大きくなってしまわないよう注意が必要である。

近赤外において、オーバースキャン領域引きは「IRAF」用に書かれた「hnttrimvirgo」を使用する。

オーバースキャン領域引きを終えたら、ダーク画像を引く。ダーク画像には読みだすときにかける電圧によって生じるバイアスも一緒に乗っているため、ダーク画像を引けばバイアスも一緒に引いたこととなる。図 3.18(3) はダークを引いた後の画像である。

フラット割りは可視光と同じように行い、バッドピクセル補正を行う。「IRAF」用に書かれた「hnbpfixvirgo」を使用し、補正を行う。可視光にもバッドピクセルと呼ばれる感度が著しく低い(または高い)ピクセルが存在するが、HONIR の近赤外検出器で読み取った画像は特に多いので補正が必要である。

3.3.3 開口測光

一次処理の完了した画像の天体の総カウントを測定するために、測光という操作を行う。今回使用する測光法は開口測光(アパーチャー測光)である。開口測光とは指定した半径内のカウント値をすべて足してカウント数を求めるというものである。しかし、そのカウント値にはスカイのカウントも乗っているため、スカイ引きを行う必要がある。IRAF では、スカイ領域の内径とスカイ幅を指定して、天体の半径内のスカイを自動で差し引いてくれる phot というタスクがあり、これを用いた。図 3.19 は開口測光の概念図である。

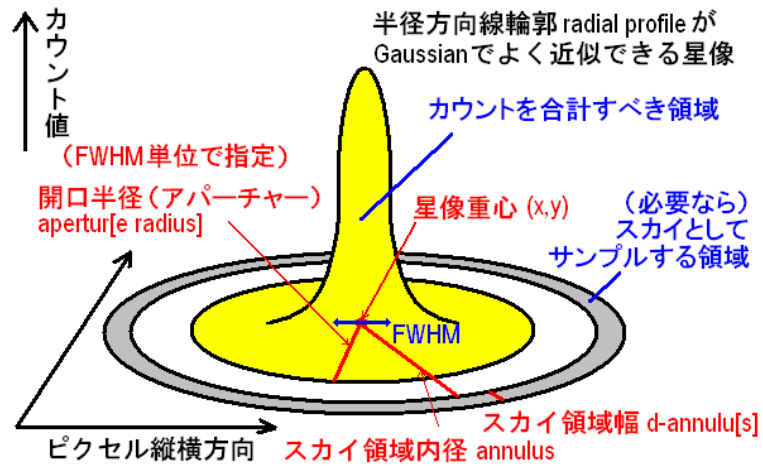


図 3.19: 開口測光の概念図

今回はスカイ領域の内径と星の半径、 $cbox^1$ は同じ値を用いている。その値は実際に星を見ながら決定したが、おおよそ半値幅²の2倍ほどである。また、スカイ幅は3ピクセルとして測光を行った。スカイ領域の内径とスカイ幅、星の半径、 $cbox$ などは観測する天体の種類やモードによって異なるためすべて同じような設定のもとで正しい測光はできない。その都度、天体に適した値で測光を行う必要がある。

¹ 指定した座標を中心にして、縦幅と横幅が $cbox$ で指定したピクセル幅であるボックスの内部のカウントを用いて、星のカウント分布の重心を決めるというパラメータ

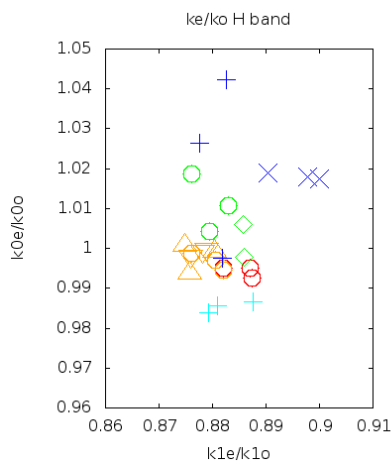
² 図 3.19 の FWHM にあたるもので、IRAF 上では MOFFAT の値

第4章 結果と考察

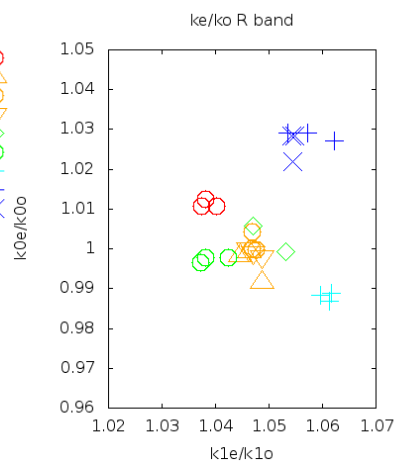
4.1 観測結果

4.1.1 器械偏光の安定性

4.1.1.1 常光と異常光の透過効率比



11/9 H HD14069
 12/2 H HD12021
 12/2 H HD14069
 12/2 H HD212311
 1/11 H BD64
 1/11 H HD14069
 1/19 H HD251204
 1/25 H TYC1926
 1/25 H BD25



11/9 R HD14069
 12/2 R HD12021
 12/2 R HD14069
 12/2 R HD212311
 1/11 R BD64
 1/11 R HD14069
 1/19 R HD251204
 1/25 R TYC1926
 1/25 R BD25

図 4.1: k_e/k_o 近赤外線 H バンド。天体ごとにシンボルは異なり、日ごとにシンボルの色が異なる。 図 4.2: k_e/k_o 可視光 R バンド。図 4.1 と同じスケールで示す。

2.1.2 で述べたように常光と異常光の透過効率比 (k_e/k_o) は、ウェッジ付きダブルウォラストンプリズムを用いた一露出型偏光測定精度に直結するパラメータであり、その安定性を評価することは重要である。表 4.1 は観測したデータから得た k_e/k_o の全データである。また、図 4.1 は近赤外線の H バンド、図 4.2 は可視光の R バンドの k_e/k_o を示したグラフであり、横軸を k_{1e}/k_{1o} (ダブルウォラストンプリズムの 2 つある常光と異常光うちの片側の透過効率比)、縦軸を k_{0e}/k_{0o} (もう片方の常光と異常光の透過効率比) として表したものである。波長によって k_e/k_o の値が異なることが判る。

また、本研究では一露出型偏光モードでの計算に採用する平均の k_e/k_o の値として、ワイヤーグリッドを除いた全体の平均を用いることとする。ワイヤーグリッドは光を 100% 偏光させる素子であり、常光、異常光の強度比が大きく異なるため、半波長板の不完全性が k_e/k_o のエラーとして表れやすい。また、2017 年 1 月 25 日のみで行なったワイヤーグリッドの観測が H バンド、R バンドともに全体から少し外れているため、全体平均を用いる際にはワイヤーグリッドの観測をのぞいた k_e/k_o の平均を用いることとした。

表 4.2 では表 4.1 で示した k_e/k_o の全体平均とワイヤーグリッドの観測を除いた平均を示している。ただ

表 4.1: 常光と異常光の透過効率比 (k_e/k_o) のデータ

| 観測日 | 天体名 | 近赤外線 H バンド | | 可視光 R バンド | |
|----------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | k_{1e}/k_{1o} | k_{0e}/k_{0o} | k_{1e}/k_{1o} | k_{0e}/k_{0o} |
| 20161109 | HD14069 | 0.8874 | 0.9925 | 1.0381 | 1.0124 |
| 20161109 | HD14069 | 0.8871 | 0.9950 | 1.0375 | 1.0108 |
| 20161109 | HD14069 | 0.8820 | 0.9952 | 1.0401 | 1.0107 |
| 20161202 | HD14069 | 0.8820 | 0.9946 | 1.0469 | 1.0043 |
| 20161202 | HD14069 | 0.8806 | 0.9971 | 1.0476 | 0.9999 |
| 20161202 | HD14069 | 0.8761 | 0.9989 | 1.0469 | 1.0001 |
| 20161202 | HD12021 | 0.8804 | 0.9992 | 1.0447 | 0.9982 |
| 20161202 | HD12021 | 0.8749 | 1.0008 | 1.0463 | 0.9993 |
| 20161202 | HD12021 | 0.8758 | 0.9937 | 1.0488 | 0.9915 |
| 20161202 | HD212311 | 0.8758 | 0.9980 | 1.0461 | 1.0001 |
| 20161202 | HD212311 | 0.8782 | 0.9993 | 1.0470 | 0.9991 |
| 20161202 | HD212311 | 0.8789 | 0.9997 | 1.0487 | 0.9980 |
| 20170111 | HD14069 | 0.8830 | 1.0107 | 1.0382 | 0.9978 |
| 20170111 | HD14069 | 0.8762 | 1.0187 | 1.0372 | 0.9966 |
| 20170111 | HD14069 | 0.8795 | 1.0043 | 1.0424 | 0.9978 |
| 20170111 | BD+64d106 | 0.8858 | 0.9978 | 1.0470 | 1.0059 |
| 20170111 | BD+64d106 | 0.8858 | 1.0060 | 1.0532 | 0.9993 |
| 20170119 | HD251204 | 0.8809 | 0.9856 | 1.0596 | 0.9883 |
| 20170119 | HD251204 | 0.8793 | 0.9838 | 1.0613 | 0.9868 |
| 20170119 | HD251204 | 0.8875 | 0.9867 | 1.0616 | 0.9887 |
| 20170125 | TYC1926-873-1 | 0.8775 | 1.0265 | 1.0572 | 1.0291 |
| 20170125 | TYC1926-873-1 | 0.8827 | 1.0422 | 1.0621 | 1.0270 |
| 20170125 | TYC1926-873-1 | 0.8819 | 0.9976 | 1.0535 | 1.0290 |
| 20170125 | BD+25 2272 | 0.8978 | 1.0179 | 1.0549 | 1.0285 |
| 20170125 | BD+25 2272 | 0.8904 | 1.0190 | 1.0542 | 1.0284 |
| 20170125 | BD+25 2272 | 0.9000 | 1.0173 | 1.0545 | 1.0218 |
| 観測日 | 天体名 | 近赤外線 Ks バンド | | 可視光 V バンド | |
| 20170125 | TYC1926-873-1 | 0.8684 | 1.0491 | 1.0675 | 1.0091 |
| 20170125 | TYC1926-873-1 | 0.9935 | 1.0018 | 1.0673 | 1.0093 |
| 20170125 | TYC1926-873-1 | 0.9178 | 1.0532 | 1.0591 | 1.0098 |
| 観測日 | 天体名 | 近赤外線 J バンド | | 可視光 I バンド | |
| 20170125 | TYC1926-873-1 | 0.9658 | 1.0218 | 1.0528 | 1.0273 |
| 20170125 | TYC1926-873-1 | 1.1755 | 1.0404 | 1.0588 | 1.0315 |
| 20170125 | TYC1926-873-1 | 1.1632 | 1.0293 | 1.0565 | 1.0327 |

表 4.2: 波長別の常光と異常光の透過効率比

| バンド名 | 全データ平均 | | WG 以外平均 | | |
|------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | k_{1e}/k_{1o} | k_{0e}/k_{0o} | k_{1e}/k_{1o} | k_{0e}/k_{0o} | |
| 可視光 | V | 1.0646 ± 0.0039 | 1.0094 ± 0.0003 | - | - |
| | R | 1.0490 ± 0.0075 | 1.0057 ± 0.0133 | 1.0470 ± 0.0072 | 0.9993 ± 0.0070 |
| | I | 1.0560 ± 0.0024 | 1.0305 ± 0.0023 | - | - |
| 近赤外線 | J | 1.1015 ± 0.0961 | 1.0305 ± 0.0076 | - | - |
| | H | 0.8826 ± 0.0062 | 1.0030 ± 0.0133 | 0.8809 ± 0.0041 | 0.9979 ± 0.0080 |
| | Ks | 0.9266 ± 0.0515 | 1.0347 ± 0.0233 | - | - |

し、可視光 V、I バンド、近赤外線 J、Ks バンドに関してはワイヤグリッドの観測一回のみであるためワイヤグリッドの観測を除くデータはないため「-」とする。以下、可視光 R バンド、近赤外線 H バンドの k_e/k_o の平均を用いる場合は表 4.2 のワイヤグリッドの観測を除いた平均の値を用いることとする。

4.1.1.2 無偏光標準星の観測結果

表 4.3: 観測モードの表記

| 項目 | 凡例上での表記 |
|------------------------------------|-----------|
| シングルウォラストンプリズムと半波長板 | swol+hw |
| ダブルウォラストンプリズムと半波長板 (0°) | dwol+hw0 |
| ダブルウォラストンプリズムと半波長板 (45°) | dwol+hw45 |
| ダブルウォラストンプリズムのみ (個別の k_e/k_o) | dwol |
| ダブルウォラストンプリズムのみ (全体平均の k_e/k_o) | dwol ave |

表 4.3 にグラフの凡例上の表記の内容を示している。以降の図や表は表 4.3 のように表記する場合がある。以下は無偏光標準星 (表 3.1 の HD14069, HD12021, HD212311) の偏光観測の結果をそれぞれ天体ごとにグラフと表で示す。偏光データは可視光 R バンド、近赤外線 H バンドで取得したものであり、データの種類は以下に示したとおりである。

- シングルウォラストンプリズムと半波長板による通常の偏光モード (swol+hw)
(4 フレームにつき 1 組の偏光パラメータ)
- ダブルウォラストンプリズムと半波長板による通常の偏光モード (dwol+hw0/45)
(4 フレームにつき 2 組の偏光パラメータ、2 組の偏光パラメータ間に 45° の偏光方位角原点のズレ)
- ダブルウォラストンプリズムによる一露出型偏光モード (dwol)
(1 フレームにつき 1 組の偏光パラメータ、個々の k_e/k_o を使用)

- ダブルウォラストンプリズムによる一露出型偏光モード (dwol ave)
(1 フレームにつき 1 組の偏光パラメータ、全体で平均した k_e/k_o を使用)

HD14069

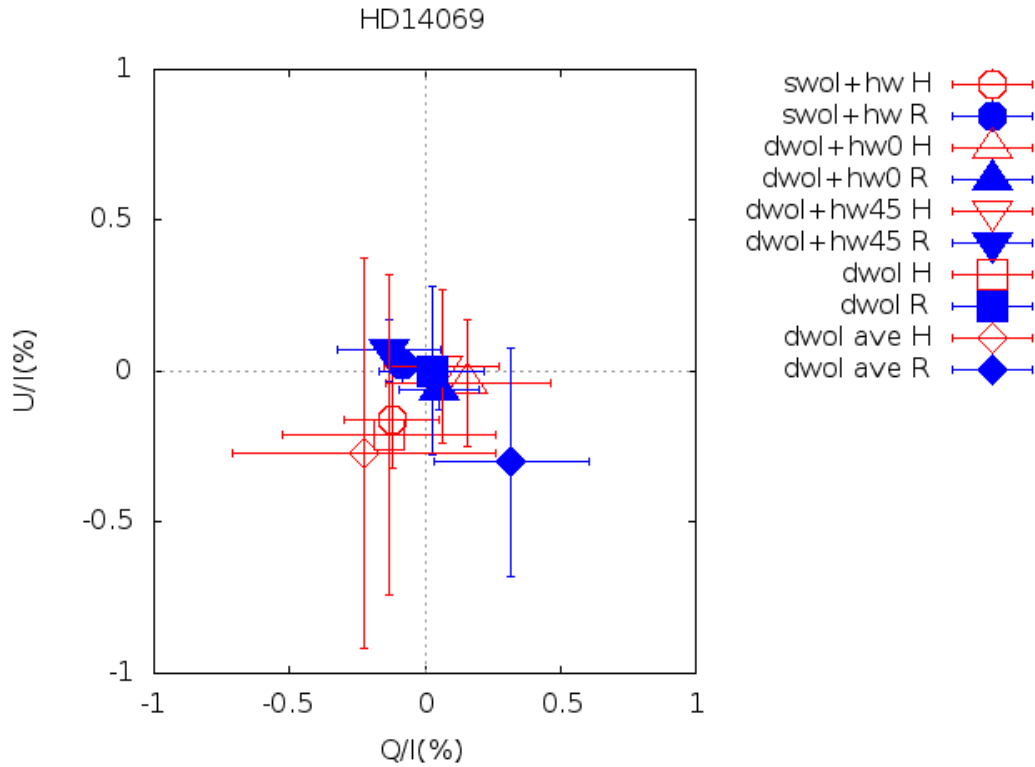


図 4.3: HD14069 の QU 平面

表 4.4: HD14069 の偏光データ

| 項目 | 近赤外線 H バンド | | | 可視光 R バンド | | |
|-----------|------------------|------------------|-----------------|------------------|-------------------|-----------------|
| | $Q/I(\%)$ | $U/I(\%)$ | 偏光度 (%) | $Q/I(\%)$ | $U/I(\%)$ | 偏光度 (%) |
| swol+hw | -0.12 ± 0.17 | -0.16 ± 0.16 | 0.20 ± 0.20 | -0.09 ± 0.05 | 0.02 ± 0.06 | 0.09 ± 0.05 |
| dwol+hw0 | 0.16 ± 0.31 | -0.04 ± 0.21 | 0.16 ± 0.30 | 0.05 ± 0.15 | -0.06 ± 0.06 | 0.08 ± 0.11 |
| dwol+hw45 | 0.06 ± 0.21 | 0.01 ± 0.25 | 0.06 ± 0.21 | -0.13 ± 0.19 | 0.07 ± 0.10 | 0.15 ± 0.18 |
| dwol | -0.13 ± 0.39 | -0.21 ± 0.53 | 0.25 ± 0.49 | 0.03 ± 0.19 | 0.002 ± 0.280 | 0.03 ± 0.19 |
| dwol ave | -0.23 ± 0.49 | -0.27 ± 0.64 | 0.35 ± 0.59 | 0.32 ± 0.29 | -0.30 ± 0.38 | 0.44 ± 0.33 |

図 4.3、表 4.4 は HD14069 の偏光観測データである。この天体に関しては、日を分けて 3 回観測してい

る。全体的に偏光度は、シングルウォラストンプリズムと半波長板を用いたもの、ダブルウォラストンプリズムと半波長板を用いたもの、ダブルウォラストンプリズムのみを用いたものの順で小さい。また、ダブルウォラストンプリズムの中でも個別の k_e/k_o を用いたほうが 0.1-0.5%程度偏光度が小さくなる。

HD12021

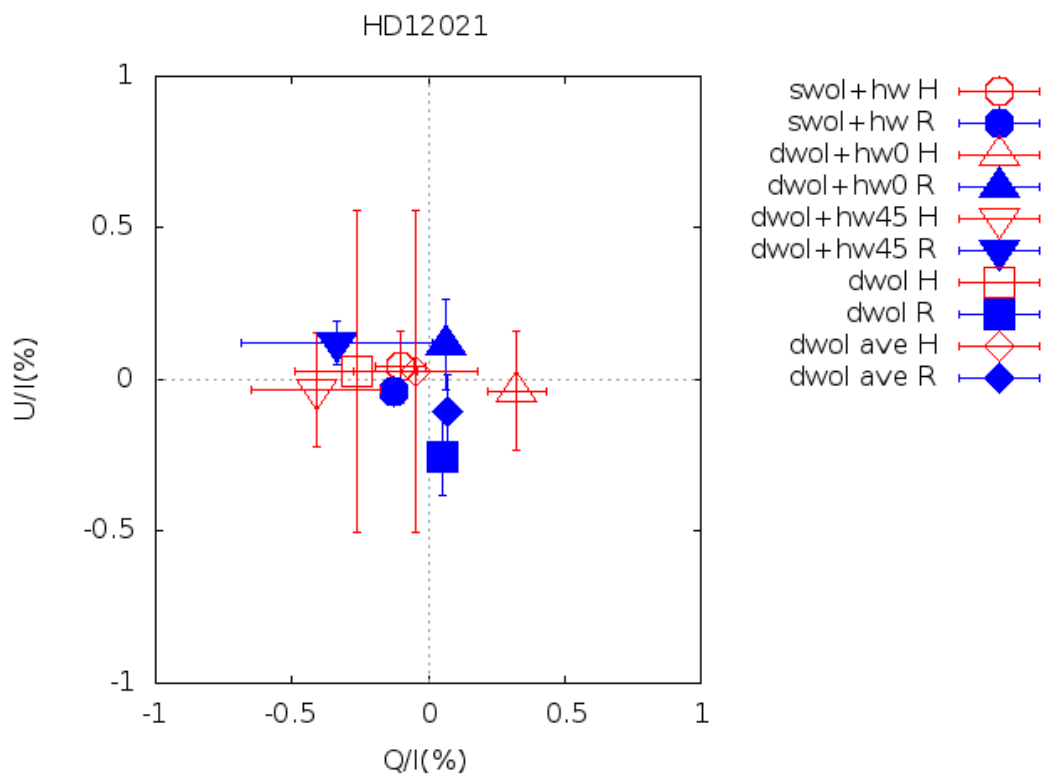


図 4.4: HD12021 の QU 平面

表 4.5: HD12021 の偏光データ

| 項目 | 近赤外線 H バンド | | | 可視光 R バンド | | |
|-----------|------------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|
| | $Q/I(\%)$ | $U/I(\%)$ | 偏光度 (%) | $Q/I(\%)$ | $U/I(\%)$ | 偏光度 (%) |
| swol+hw | -0.10 ± 0.09 | 0.04 ± 0.12 | 0.11 ± 0.10 | -0.12 ± 0.03 | -0.04 ± 0.01 | 0.13 ± 0.03 |
| dwol+hw0 | 0.32 ± 0.11 | -0.04 ± 0.20 | 0.33 ± 0.11 | 0.07 ± 0.03 | 0.12 ± 0.15 | 0.13 ± 0.13 |
| dwol+hw45 | -0.41 ± 0.24 | -0.03 ± 0.19 | 0.41 ± 0.24 | -0.34 ± 0.35 | 0.12 ± 0.07 | 0.36 ± 0.33 |
| dwol | -0.26 ± 0.23 | 0.03 ± 0.53 | 0.26 ± 0.23 | 0.05 ± 0.03 | -0.26 ± 0.13 | 0.26 ± 0.12 |
| dwol ave | -0.05 ± 0.23 | 0.03 ± 0.53 | 0.05 ± 0.34 | 0.07 ± 0.03 | -0.11 ± 0.13 | 0.12 ± 0.11 |

図 4.4、表 4.5 は HD12021 の偏光観測データである。ただし、この天体は 1 回の観測データしかない。偏光度は、シングルウォラストンプリズムと半波長板を用いたもの、ダブルウォラストンプリズムのみを用いたもの、ダブルウォラストンプリズムと半波長板を用いたものの順で小さい。また、ダブルウォラストンプリズムにおいては個別の k_e/k_o と平均の k_e/k_o を用いた時では、HD14069 の時とは逆で、平均の k_e/k_o のほうが偏光度が 0.1%程度小さい。

HD212311

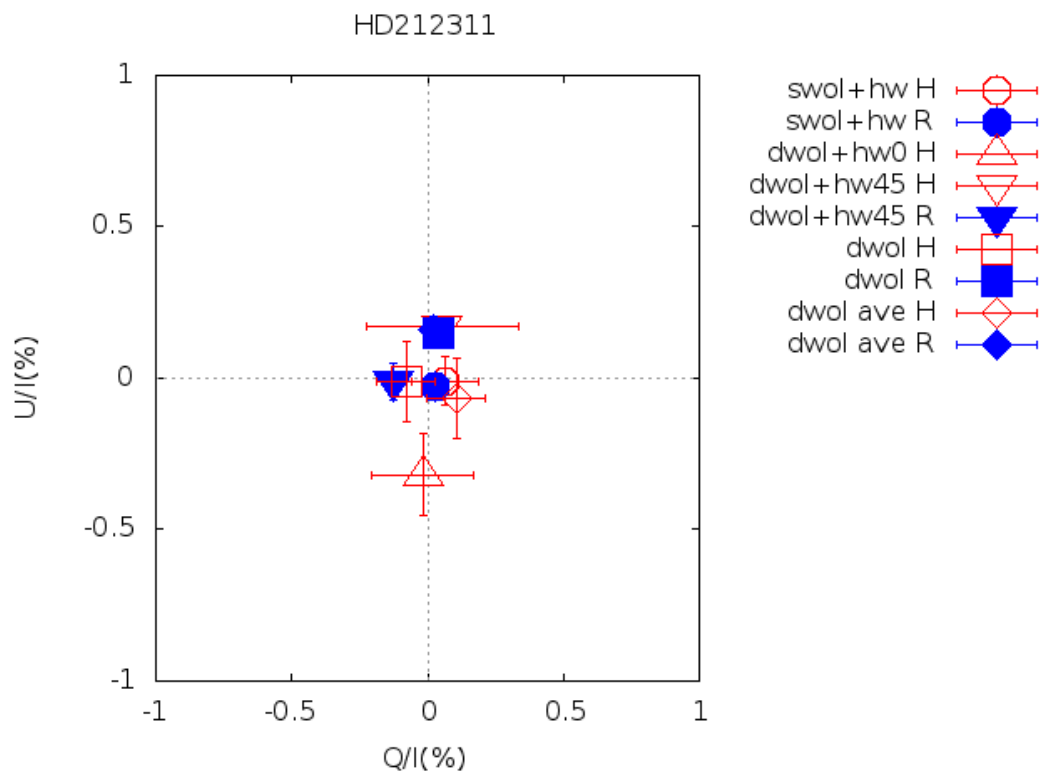


図 4.5: HD212311 の QU 平面

表 4.6: HD212311 の偏光データ

| 項目 | 近赤外線 H バンド | | | 可視光 R バンド | | |
|-----------|------------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|
| | $Q/I(\%)$ | $U/I(\%)$ | 偏光度 (%) | $Q/I(\%)$ | $U/I(\%)$ | 偏光度 (%) |
| swol+hw | 0.06 ± 0.12 | -0.01 ± 0.08 | 0.06 ± 0.12 | 0.03 ± 0.06 | -0.03 ± 0.03 | 0.04 ± 0.02 |
| dwol+hw0 | -0.02 ± 0.19 | -0.32 ± 0.14 | 0.32 ± 0.14 | 0.02 ± 0.03 | -0.03 ± 0.03 | 0.03 ± 0.03 |
| dwol+hw45 | 0.05 ± 0.28 | 0.17 ± 0.02 | 0.18 ± 0.09 | -0.12 ± 0.04 | -0.01 ± 0.06 | 0.13 ± 0.04 |
| dwol | -0.09 ± 0.11 | -0.01 ± 0.13 | 0.08 ± 0.11 | 0.04 ± 0.02 | 0.15 ± 0.04 | 0.16 ± 0.04 |
| dwol ave | 0.10 ± 0.11 | -0.06 ± 0.13 | 0.12 ± 0.12 | 0.02 ± 0.02 | 0.16 ± 0.04 | 0.16 ± 0.04 |

図 4.5、表 4.6 は HD212311 の偏光観測データであり、こちらも 1 回の観測データしかない。全体的に誤差は小さく、ダブルウォラストンプリズムと半波長を用いたものが多少誤差が大きい。また、ダブルウォラストンプリズムにおいては個別の k_e/k_o と平均の k_e/k_o を用いた時、どちらの精度もほとんど変化はない。

4.1.1.3 器械偏光の安定性の評価

無偏光標準星は、偏光度が典型的に 0.1% 以下であるので、無偏光標準星の観測で得られた偏光値は器械偏光とみなすことができ、装置の器械偏光を評価することができる。

HONIR で通常の偏光観測として行なっている、シングルウォラストンプリズムと半波長板を用いた通常偏光観測モードの器械偏光は H バンドは 0.3% 程度であり、R バンドは 0.1% 程度である。

ダブルウォラストンプリズムと半波長板の通常偏光観測モードの器械偏光は天体によりばらつきはあるが、近赤外線は 0.4% 程度、可視光では 0.3% 程度である。

ダブルウォラストンプリズムを用いた一露出型偏光観測モードの器械偏光は、近赤外線は 0.5% 程度であり、可視光では 0.3% 程度である。さらに、個別の k_e/k_o を用いた場合、平均の k_e/k_o を用いるよりも 0.1% 程度器械偏光が小さくなった。

よって、ウェッジ付きダブルウォラストンプリズムを用いた一露出型偏光観測を行う場合、器械偏光が近赤外線 H バンドでは 0.5%、近赤外線 R バンドでは 0.3% ほど生じるので、それ以上の精度での偏光観測を望む場合は、通常のシングルウォラストンプリズムと半波長板を用いる偏光観測を行うと良い。

表 4.7: QU の典型的なズレ

| 項目 | 図 4.6 での表示 | 近赤外線 H バンド | | | 可視光 R バンド | | |
|--------------------|------------|------------|----------|------------|-----------|----------|------------|
| | | offset | σ | 典型的なズレ (%) | offset | σ | 典型的なズレ (%) |
| swol+hwp | ImPol Q | -0.07 | 0.18 | 0.19 | -0.07 | -0.07 | 0.10 |
| | ImPol U | -0.08 | 0.17 | 0.19 | 0.00 | 0.06 | 0.06 |
| dwol、個々の k_e/k_o | keko Q | -0.14 | 0.34 | 0.37 | 0.04 | 0.15 | 0.16 |
| | keko U | -0.08 | 0.40 | 0.41 | -0.01 | 0.26 | 0.26 |
| dwol、平均の k_e/k_o | ave keko Q | -0.14 | -0.43 | 0.46 | 0.22 | -0.27 | 0.35 |
| | ave keko U | 0.22 | -0.27 | 0.35 | -0.19 | 0.35 | 0.40 |

また、図 4.6 では、今回観測したすべての無偏光標準星のシングルウォラストンプリズムと半波長板、ダブルウォラストンプリズムを用いた偏光観測の典型的なズレを示している。横軸が $Q/I(\%)$ または $U/I(\%)$ で、縦軸がカウント数となっている。赤色のヒストグラムとフィッティングした曲線が Q に関するものであり、青色が U に関するものである。また、これはヒストグラムをガウスフィットでフィッティングしたものであり、ガウスフィットの式は以下のとおりである。

$$f = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

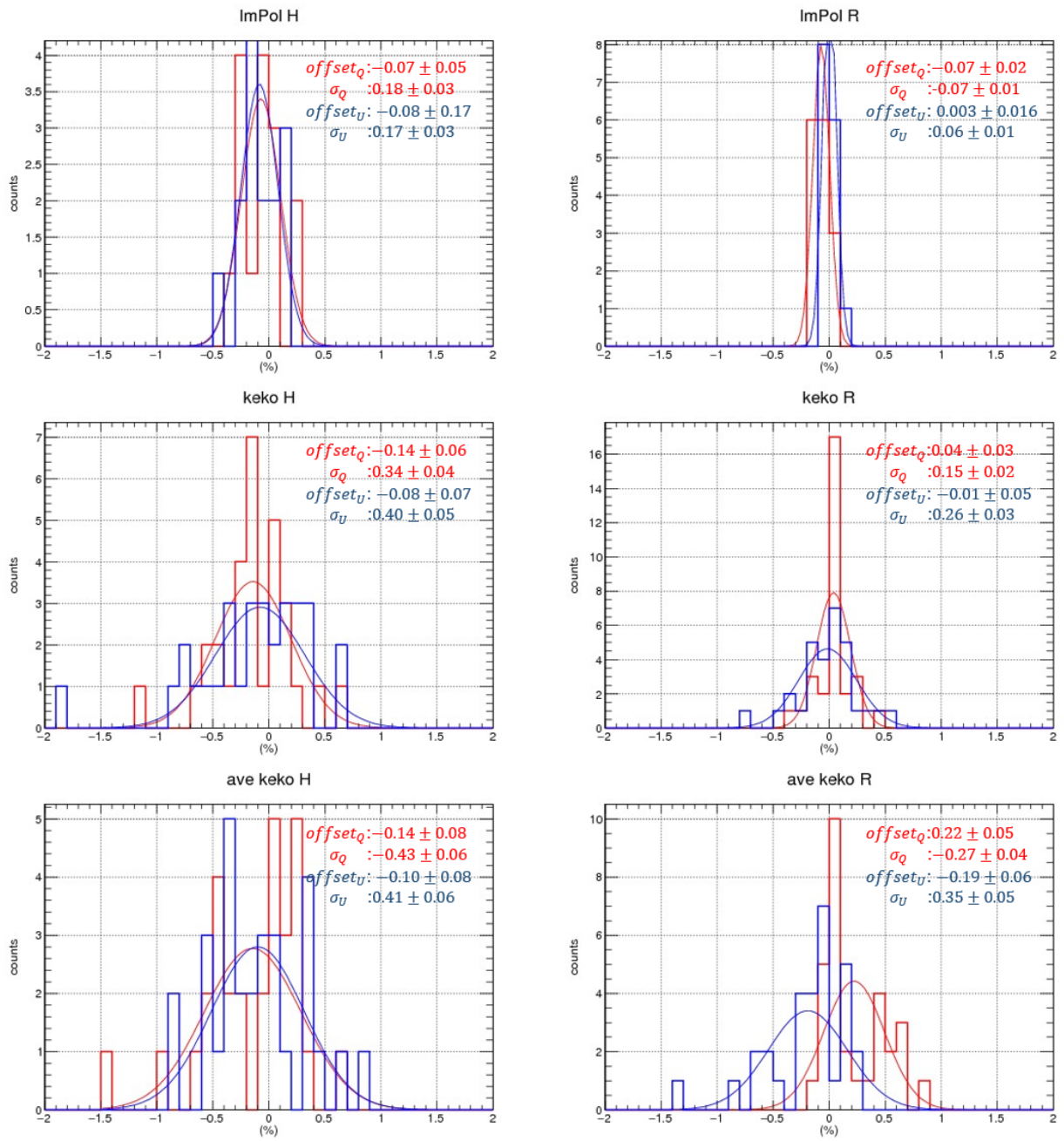


図 4.6: QU のヒストグラム

上の式において μ はグラフの中心のズレ、 σ は標準偏差を示している。図 4.6、表 4.7 において μ は offset と表し、 σ はそのまま σ の値を示している。図 4.6 の一行目はシングルウォラストンプリズムと半波長板の通常偏光モード、二行目はダブルウォラストンプリズムの一露出型偏光モードで計算において個々の k_e/k_o を用いたもの、三行目はダブルウォラストンプリズムの一露出型偏光モードで計算において平均の k_e/k_o を用いたものをそれぞれ比較しており、行が上になるほどグラフの広がり小さい。

また、表 4.7 における典型的なズレは中心 0 からのズレとヒストグラムの広がりを考え、 $\sqrt{\sigma^2 + \mu^2}$ として計算している。典型的なズレはシングルウォラストンプリズムによる通常偏光モードのものが一番小さく、R バンドでは 0.1% ほど、H バンドでは 0.2% 程度である。ダブルウォラストンプリズムを用いた一露出型偏光モードでは、個々の k_e/k_o を用いた場合、R バンドは 0.3% 程度、H バンドが 0.4% 程度であり、平均の k_e/k_o を用いた場合は、R バンドは 0.4% 程度、H バンドが 0.45% 程度で 0.1% ほどの差がバンドごとにあった。

つまり、図 4.6、表 4.7 から判るように、 k_e/k_o は平均を用いるよりは、日ごとに変化することがあるので個別に求めるほうが、器械偏光が 0.1% 程度抑えることができる。 k_e/k_o が日ごとに異なる理由として、光学素子群を含む装置全体の重力方向に対するたわみと、それによる入射光束のウォラストンプリズム上の照射位置の変化等が考えられる。

4.1.2 偏光能率の波長依存性、偏光方位角の波長依存性

4.1.2.1 ワイヤグリッドを用いた観測結果

ワイヤグリッドは波長に依らず、同じ方位角でほぼ完全偏光した光を生成することから、装置の偏光能率 (= 消偏光率) や等価光学軸の波長依存性を求めるキャリブレーションに用いられる。

表 4.8: ワイヤーグリッドの偏光データ (TYC1926-873-1)

| 項目 | $Q/I(\%)$ | $U/I(\%)$ | 偏光度 (%) ¹ | 偏光方位角 (°) ¹ | $\theta_{band} - \theta_R(^{\circ})$ |
|-------------------------|-------------------|-------------------|----------------------|------------------------|--------------------------------------|
| 近赤外線 H バンド | | | | | |
| swol+hw | -40.43 ± 0.30 | 84.78 ± 0.16 | 93.92 ± 0.19 | 57.75 ± 0.08 | 3.45 ± 0.10 |
| dwol+hw0 | 38.44 ± 0.05 | -85.40 ± 0.07 | 93.65 ± 0.07 | -32.88 ± 0.02 | 10.14 ± 0.13 |
| dwol+hw45 | 82.77 ± 0.31 | 46.35 ± 0.13 | 94.86 ± 0.28 | 14.62 ± 0.06 | 0.78 ± 0.10 |
| dwol | -92.17 ± 0.61 | 5.09 ± 0.26 | 92.31 ± 0.61 | 88.42 ± 0.08 | 7.12 ± 0.11 |
| dwol ave | -92.17 ± 0.61 | 3.89 ± 0.26 | 92.25 ± 0.61 | 88.79 ± 0.09 | 6.77 ± 0.11 |
| 可視光 R バンド | | | | | |
| swol+hw | -19.92 ± 0.09 | 59.18 ± 0.17 | 62.44 ± 0.16 | 54.30 ± 0.05 | 0 ± 0.07 |
| dwol+hw0 | 4.47 ± 0.29 | -64.67 ± 0.16 | 64.85 ± 0.16 | -43.03 ± 0.13 | 0 ± 0.18 |
| dwol+hw45 | 61.16 ± 0.15 | 32.09 ± 0.21 | 69.07 ± 0.16 | 13.84 ± 0.08 | 0 ± 0.12 |
| dwol | -54.68 ± 0.15 | 17.13 ± 0.13 | 57.30 ± 0.15 | 81.30 ± 0.08 | 0 ± 0.10 |
| dwol ave | -55.03 ± 0.15 | 15.74 ± 0.13 | 57.24 ± 0.15 | 82.02 ± 0.07 | 0 ± 0.10 |
| 近赤外線 K _s バンド | | | | | |
| swol+hw | -36.86 ± 0.57 | 89.39 ± 0.46 | 96.69 ± 0.48 | 56.21 ± 0.16 | 1.91 ± 0.17 |
| dwol+hw0 | 36.05 ± 0.32 | -90.65 ± 0.40 | 97.56 ± 0.39 | -34.16 ± 0.10 | 8.87 ± 0.16 |
| dwol+hw45 | 87.61 ± 0.53 | 41.73 ± 0.19 | 97.04 ± 0.49 | 12.74 ± 0.08 | -1.11 ± 0.12 |
| dwol | -96.19 ± 0.32 | 5.28 ± 0.73 | 96.34 ± 0.33 | 88.43 ± 0.22 | 7.13 ± 0.23 |
| 可視光 V バンド | | | | | |
| swol+hw | -16.61 ± 0.14 | 47.25 ± 0.10 | 50.09 ± 0.10 | 54.69 ± 0.08 | 0.39 ± 0.09 |
| dwol+hw0 | -2.3 ± 0.49 | -54.85 ± 0.34 | 54.90 ± 0.34 | -46.20 ± 0.26 | -3.17 ± 0.29 |
| dwol+hw45 | 48.90 ± 0.15 | 28.31 ± 0.68 | 56.51 ± 0.37 | 15.03 ± 0.30 | 1.19 ± 0.31 |
| dwol | -41.55 ± 0.22 | 19.46 ± 0.12 | 45.88 ± 0.21 | 77.45 ± 0.09 | -3.85 ± 0.11 |
| 近赤外線 J バンド | | | | | |
| swol+hw | -46.00 ± 0.06 | 75.59 ± 0.35 | 88.49 ± 0.30 | 60.66 ± 0.06 | 6.36 ± 0.08 |
| dwol+hw0 | 46.17 ± 0.55 | -82.13 ± 2.96 | 94.22 ± 2.60 | -30.33 ± 0.47 | 12.70 ± 0.48 |
| dwol+hw45 | 74.22 ± 1.08 | 51.33 ± 0.61 | 90.24 ± 0.95 | 17.33 ± 0.25 | 3.49 ± 0.27 |
| dwol | -92.77 ± 7.45 | 7.60 ± 0.54 | 93.09 ± 7.42 | 87.66 ± 0.25 | 6.36 ± 0.26 |
| 可視光 I バンド | | | | | |
| swol+hw | -32.49 ± 1.10 | 65.71 ± 0.14 | 73.30 ± 0.50 | 58.16 ± 0.39 | 3.86 ± 0.39 |
| dwol+hw0 | 21.41 ± 0.07 | -73.32 ± 0.07 | 76.38 ± 0.07 | -36.86 ± 0.03 | 6.17 ± 0.13 |
| dwol+hw45 | 65.10 ± 0.34 | 42.30 ± 0.17 | 77.64 ± 0.30 | 16.51 ± 0.09 | 2.67 ± 0.12 |
| dwol | -70.42 ± 0.17 | 12.09 ± 1.28 | 71.46 ± 0.27 | 85.13 ± 0.51 | 3.83 ± 0.51 |

¹ 器械座標のままであり、消偏光、偏光方位角原点による補正は行なっていない値である。

表 4.9: ワイヤーグリッドの偏光データ (BD+25 2272)

| 項目 | $Q/I(\%)$ | $U/I(\%)$ | 偏光度 (%) ¹ | 偏光方位角 (°) ¹ | $\theta_{band} - \theta_R(°)$ |
|------------|---------------|---------------|----------------------|------------------------|-------------------------------|
| 近赤外線 H バンド | | | | | |
| swol+hw | -40.47 ± 0.16 | 84.89 ± 0.20 | 94.04 ± 0.19 | 57.74 ± 0.05 | 3.73 ± 0.14 |
| dwol+hw0 | 38.18 ± 0.054 | -85.12 ± 0.17 | 93.29 ± 0.15 | -32.92 ± 0.03 | 10.69 ± 0.16 |
| dwol+hw45 | 82.53 ± 0.30 | 46.45 ± 0.11 | 94.70 ± 0.26 | 14.69 ± 0.05 | 1.26 ± 0.06 |
| dwol | -91.64 ± 0.51 | 4.93 ± 0.39 | 91.78 ± 0.51 | 88.46 ± 0.12 | 7.14 ± 0.13 |
| dwol ave | -91.78 ± 0.50 | 3.93 ± 0.39 | 91.86 ± 0.50 | 88.77 ± 0.12 | 6.77 ± 0.13 |
| 可視光 R バンド | | | | | |
| swol+hw | -19.17 ± 0.29 | 58.91 ± 0.17 | 61.95 ± 0.19 | 54.01 ± 0.13 | 0 ± 0.18 |
| dwol+hw0 | 3.12 ± 0.36 | -64.35 ± 0.10 | 64.43 ± 0.10 | -43.61 ± 0.16 | 0 ± 0.22 |
| dwol+hw45 | 82.53 ± 0.30 | 46.45 ± 0.11 | 68.57 ± 0.15 | 13.43 ± 0.03 | 0 ± 0.05 |
| dwol | -53.33 ± 0.15 | 16.67 ± 0.10 | 55.88 ± 0.14 | 81.32 ± 0.055 | 0 ± 0.08 |
| dwol ave | -53.59 ± 0.15 | 15.37 ± 0.10 | 55.75 ± 0.14 | 82.00 ± 0.05 | 0 ± 0.08 |

¹ 器械座標のままであり、消偏光、偏光方位角原点による補正は行っていない値である。

表 4.8 と表 4.9 はワイヤーグリッドを用いた偏光観測の結果を示している。1 つ目の天体 (TYC1926-873-1) では可視光 V、R、I バンド、近赤外線 J、H、K_s バンドで観測し、結果は表 4.8 へ、2 つ目の天体 (BD+25 2272) では可視光 R バンド、近赤外線 H バンドで観測し、結果は表 4.9 に示している。この表において、偏光度と偏光方位角は器械座標のままであり、消偏光、偏光方位角原点による補正は行っていない。

偏光能率の波長依存性を図 4.7 に示している (波長は表 1.3 を参照)。凡例において天体名をそれぞれ省略形で記している。横軸が中心波長で、縦軸が偏光能率となっている。表 4.8 と表 4.9 上の偏光度の値を図 4.7 では、偏光能率と言い換えてプロットしている。ワイヤーグリッドを通過した光は本来 100% 偏光の光であるので、観測から得られた偏光度は偏光能率 (消偏光) と言える。図 4.7 より、偏光能率はモードによらず同じように変動しており、短波長側 (可視光側) の方が偏光能率は悪くなってはいるが、シングルウォラストンプリズム、ダブルウォラストンプリズムどちらも同じように変動しているため、結晶 $LiYF_4$ の特性と考えられる¹。

偏光方位角の波長依存性は図 4.8 に示している。この表では、各バンドの中心波長を横軸に、偏光方位角を縦軸としている。この図での偏光方位角は R バンドのものを基準とし、各モードでの R バンドに対する差 (表 4.8 と表 4.9 における $\theta_{band} - \theta_R$ の値) をプロットしている。HONIR で用いている広帯域半波長板には光学軸が波長依存性を持つ特徴があり、図 4.8 の観測結果でも波長により変化していることが判る。半波長板を入れていないダブルウォラストンのみの一露出型モードでも波長依存性の傾向が短波長側で見えており、変動が図 4.7 に似ていることから、その原因も結晶 $LiYF_4$ の特性によるものと考えられる。

また、バンド間の偏光方位角の原点の回転量は、ワイヤーグリッドの観測結果から既に求めており、今後器械座標から天球座標に変換する偏光キャリブレーションで必要になる量である。ワイヤーグリッドの

¹(追記)2017 年夏以降の観測により、この可視域で見られる消偏光は $LiYF_4$ 結晶ではなく、HONIR のコリメータレンズの個性である可能性が高まり、調査を行なっている。2017 年 8 月以降の新しいコリメータレンズを使用した観測では、ワイヤーグリッド使用時の偏光度は可視域でも軒並み 99% 近い。

観測は強偏光標準星の観測よりも S/N(信号(シグナル)に対するノイズの比)が各段に高く、かつ偏光方位角一定と近似できるためより信頼できる値である。Hバンド以外の偏光方位角原点の回転量は現時点では表 4.8 の値を用いると良いが、Hバンドの観測は2回行われているため、その平均値を用いることが望ましい。各モードでのRバンドに対するHバンドの偏光方位角原点の回転量を表 4.10 に示す。

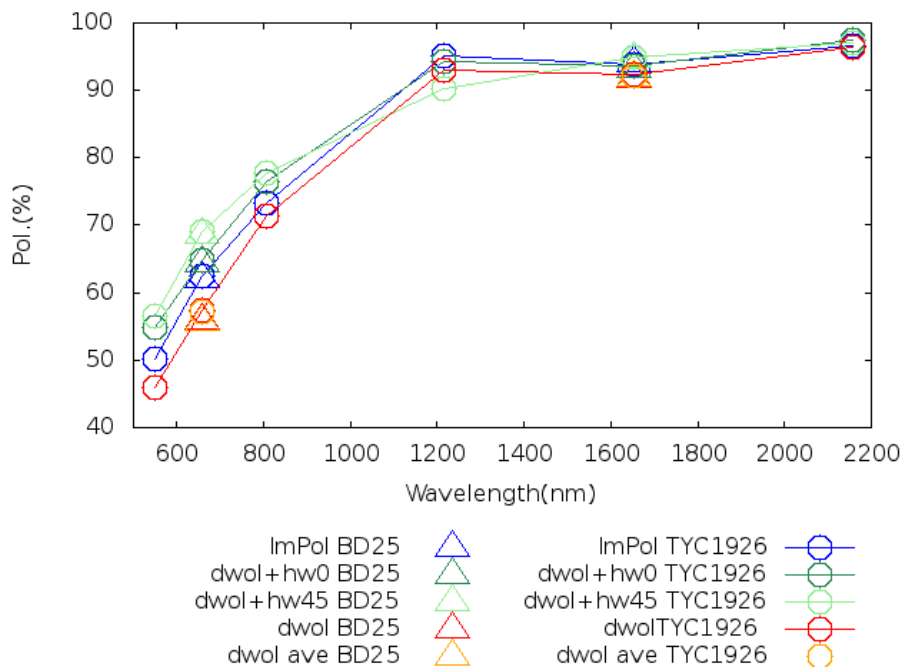


図 4.7: WG を用いた偏光観測による偏光能率の波長依存性

表 4.10: モードごとの H バンドの偏光方位角の R バンドに対する回転量

| 項目 | $\theta_H - \theta_R(^{\circ})$ |
|-----------|---------------------------------|
| swol+hw | 3.59 ± 0.09 |
| dwol+hw0 | 10.42 ± 0.10 |
| dwol+hw45 | 1.02 ± 0.06 |
| dwol | 7.13 ± 0.09 |

4.1.3 天球上での偏光方位角原点

4.1.3.1 強偏光標準星の観測結果

強偏光標準星の偏光観測により各モードごとに天球上での偏光方位角原点を求める。また、表 4.11 では、ワイヤーグリッドを用いた 2 天体の R バンド、H バンドのそれぞれの偏光能率を平均したものを、各バンド

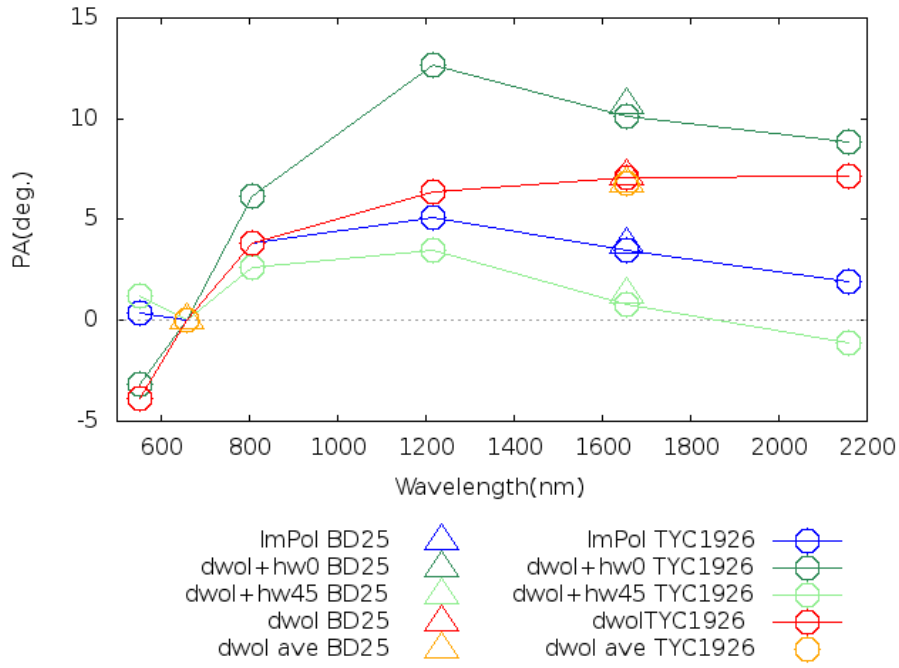


図 4.8: WG を用いた偏光観測による偏光方位角の波長依存性

の偏光能率として示している。表 4.11 中の偏光能率の値を用いて、強偏光標準星の偏光度も評価していく。

表 4.11: R バンド、H バンドの偏光能率 (単位:%)

| 項目 | 近赤外 H バンド | 可視光 R バンド |
|-----------|------------------|------------------|
| swol+hw | 93.98 ± 0.14 | 62.20 ± 0.12 |
| dwol+hw0 | 93.47 ± 0.08 | 64.64 ± 0.09 |
| dwol+hw45 | 94.78 ± 0.19 | 68.82 ± 0.11 |
| dwol | 92.04 ± 0.40 | 56.59 ± 0.10 |
| dwol ave | 92.06 ± 0.40 | 56.49 ± 0.10 |

表 4.12: 2017 年 1 月 11 日 BD+64d106 の偏光データ

| 項目 | $Q/I(\%)$ | $U/I(\%)$ | 偏光度 (%) ¹ | 偏光度 (消偏光補正後) | 偏光方位角 (°) ¹ |
|------------|------------------|------------------|----------------------|-----------------|------------------------|
| 近赤外線 H バンド | | | | | |
| swol+hw | -1.33 ± 0.04 | 1.53 ± 0.36 | 2.03 ± 0.27 | 2.16 ± 0.41 | 65.52 ± 3.36 |
| dwol+hw0 | 1.09 ± 0.18 | -0.90 ± 0.04 | 1.42 ± 0.14 | 1.52 ± 0.20 | -19.83 ± 2.38 |
| dwol+hw45 | 1.25 ± 0.08 | 1.50 ± 0.01 | 1.96 ± 0.05 | 2.06 ± 0.40 | 25.08 ± 0.89 |
| dwol | -3.67 ± 0.34 | -2.38 ± 0.35 | 4.38 ± 0.34 | 4.75 ± 1.93 | -73.51 ± 2.29 |
| dwol ave | -2.49 ± 0.34 | -0.11 ± 0.35 | 2.49 ± 0.34 | 2.71 ± 1.13 | -88.69 ± 4.06 |
| 可視光 R バンド | | | | | |
| swol+hw | -2.13 ± 0.08 | 2.60 ± 0.15 | 3.36 ± 0.12 | 5.40 ± 0.69 | 64.70 ± 0.96 |
| dwol+hw0 | 1.72 ± 0.30 | -3.03 ± 0.15 | 3.48 ± 0.20 | 5.39 ± 0.60 | -30.20 ± 2.26 |
| dwol+hw45 | 2.40 ± 0.04 | 2.90 ± 0.41 | 3.76 ± 0.32 | 5.47 ± 0.76 | 25.17 ± 2.01 |
| dwol | -3.39 ± 0.35 | 0.10 ± 1.07 | 3.39 ± 0.35 | 5.99 ± 0.88 | 89.16 ± 9.06 |
| dwol ave | -3.39 ± 0.35 | -0.10 ± 1.07 | 3.39 ± 0.35 | 6.00 ± 0.88 | -89.15 ± 9.07 |

¹ 器械座標のままであり、消偏光、偏光方位角原点による補正は行なっていない値である。

表 4.13: 2017 年 1 月 19 日 HD251204 の偏光データ

| 項目 | $Q/I(\%)$ | $U/I(\%)$ | 偏光度 (%) ¹ | 偏光度 (消偏光補正後) | 偏光方位角 (°) ¹ |
|------------|------------------|------------------|----------------------|-----------------|------------------------|
| 近赤外線 H バンド | | | | | |
| swol+hw | -0.80 ± 0.03 | -1.43 ± 0.06 | 1.64 ± 0.05 | 1.74 ± 0.24 | -59.65 ± 0.69 |
| dwol+hw0 | 0.79 ± 0.02 | 1.37 ± 0.18 | 1.58 ± 0.16 | 1.69 ± 0.22 | 29.93 ± 1.70 |
| dwol+hw45 | -1.37 ± 0.30 | 0.91 ± 0.27 | 1.64 ± 0.29 | 1.73 ± 0.45 | 73.26 ± 4.79 |
| dwol | 0.81 ± 0.21 | -1.77 ± 0.30 | 1.95 ± 0.29 | 2.12 ± 0.90 | -32.64 ± 3.34 |
| dwol ave | 0.72 ± 0.21 | -1.14 ± 0.30 | 1.35 ± 0.28 | 1.46 ± 0.65 | -28.89 ± 5.08 |
| 可視光 R バンド | | | | | |
| swol+hw | -1.44 ± 0.15 | -2.59 ± 0.07 | 2.96 ± 0.09 | 4.76 ± 0.60 | -59.60 ± 1.27 |
| dwol+hw0 | 1.90 ± 0.07 | 2.33 ± 0.04 | 3.01 ± 0.06 | 4.65 ± 0.45 | 25.42 ± 0.58 |
| dwol+hw45 | -3.19 ± 0.02 | 1.30 ± 0.14 | 3.45 ± 0.06 | 5.01 ± 0.56 | 78.93 ± 1.09 |
| dwol | 1.87 ± 0.08 | -3.23 ± 0.05 | 3.73 ± 0.06 | 6.59 ± 0.69 | -29.94 ± 0.56 |
| dwol ave | 1.21 ± 0.08 | -2.65 ± 0.05 | 2.92 ± 0.06 | 5.16 ± 0.54 | -32.73 ± 0.73 |

¹ 器械座標のままであり、消偏光、偏光方位角原点による補正は行なっていない値である。

表 4.14: 2017 年 2 月 21 日 HD155197 の偏光データ

| 項目 | $Q/I(\%)$ | $U/I(\%)$ | 偏光度 (%) ¹ | 偏光度 (消偏光補正後) | 偏光方位角 (°) ¹ |
|------------|------------------|------------------|----------------------|-----------------|------------------------|
| 近赤外線 H バンド | | | | | |
| swol+hw | -1.29 ± 0.33 | 0.95 ± 0.12 | 1.60 ± 0.28 | 1.70 ± 0.37 | 71.86 ± 3.40 |
| dwol+hw0 | 0.93 ± 0.13 | -0.66 ± 0.14 | 1.14 ± 0.13 | 1.22 ± 0.18 | -17.74 ± 3.46 |
| dwol+hw45 | 0.55 ± 0.14 | 1.34 ± 0.19 | 1.45 ± 0.19 | 1.53 ± 0.35 | 33.73 ± 2.88 |
| dwol | -1.18 ± 0.16 | -0.76 ± 0.27 | 1.40 ± 0.20 | 1.52 ± 0.64 | -73.55 ± 5.02 |
| 可視光 R バンド | | | | | |
| swol+hw | -1.95 ± 0.05 | 1.85 ± 0.02 | 2.69 ± 0.04 | 4.33 ± 0.53 | 68.23 ± 0.39 |
| dwol+hw0 | 1.35 ± 0.17 | -2.41 ± 0.07 | 2.76 ± 0.10 | 4.27 ± 0.43 | -30.40 ± 1.56 |
| dwol+hw45 | 1.18 ± 0.61 | 2.63 ± 0.26 | 2.89 ± 0.35 | 4.20 ± 0.68 | 32.90 ± 5.63 |
| dwol | -1.74 ± 0.12 | 0.33 ± 0.55 | 1.77 ± 0.15 | 3.13 ± 0.42 | 84.70 ± 8.72 |

¹ 器械座標のままであり、消偏光、偏光方位角原点による補正は行なっていない値である。

表 4.15: 2017 年 4 月 13 日 HD251204 の偏光データ

| 項目 | $Q/I(\%)$ | $U/I(\%)$ | 偏光度 (%) ¹ | 偏光度 (消偏光補正後) | 偏光方位角 (°) ¹ |
|------------|------------------|------------------|----------------------|-----------------|------------------------|
| 近赤外線 H バンド | | | | | |
| dwol+hw0 | 0.70 ± 0.21 | 1.43 ± 0.18 | 1.59 ± 0.19 | 1.70 ± 0.21 | 31.89 ± 3.73 |
| dwol+hw45 | -1.63 ± 0.27 | 0.51 ± 0.30 | 1.71 ± 0.27 | 1.81 ± 0.29 | 81.31 ± 5.00 |
| dwol | 1.23 ± 0.26 | -1.41 ± 0.17 | 1.87 ± 0.22 | 2.04 ± 0.24 | -24.46 ± 3.52 |
| 可視光 R バンド | | | | | |
| dwol+hw0 | 1.97 ± 0.07 | 3.01 ± 0.18 | 3.60 ± 0.16 | 5.57 ± 0.24 | 28.43 ± 0.92 |
| dwol+hw45 | -3.33 ± 0.13 | 1.40 ± 0.08 | 3.62 ± 0.12 | 5.25 ± 0.18 | 78.64 ± 0.73 |
| dwol | 2.06 ± 0.25 | -3.33 ± 0.36 | 3.91 ± 0.33 | 6.92 ± 0.59 | -29.09 ± 2.08 |

¹ 器械座標のままであり、消偏光、偏光方位角原点による補正は行なっていない値である。

表 4.16: 2017 年 4 月 13 日 HD155197 の偏光データ

| 項目 | $Q/I(\%)$ | $U/I(\%)$ | 偏光度 (%) ¹ | 偏光度 (消偏光補正後) | 偏光方位角 (°) ¹ |
|------------|------------------|------------------|----------------------|-----------------|------------------------|
| 近赤外線 H バンド | | | | | |
| dwol+hw0 | 0.97 ± 0.10 | -0.58 ± 0.12 | 1.13 ± 0.11 | 1.21 ± 0.11 | -15.52 ± 2.90 |
| dwol+hw45 | 0.69 ± 0.06 | 1.16 ± 0.12 | 1.35 ± 0.11 | 1.43 ± 0.12 | 29.64 ± 1.78 |
| dwol | -1.00 ± 0.23 | -0.39 ± 0.06 | 1.07 ± 0.22 | 1.16 ± 0.23 | -79.42 ± 2.67 |
| 可視光 R バンド | | | | | |
| dwol+hw0 | 2.01 ± 0.20 | -2.08 ± 0.17 | 2.89 ± 0.18 | 4.47 ± 0.28 | -22.93 ± 1.83 |
| dwol+hw45 | 1.54 ± 0.03 | 2.74 ± 0.13 | 3.15 ± 0.11 | 4.58 ± 0.16 | 30.31 ± 0.62 |
| dwol | -2.38 ± 0.07 | -0.95 ± 0.10 | 2.56 ± 0.08 | 4.52 ± 0.13 | -79.08 ± 1.11 |

¹ 器械座標のままであり、消偏光、偏光方位角原点による補正は行なっていない値である。

2017 年 2 月 21 日以降のデータは追加で取得したものであるため、平均の k_e/k_o を用いた計算は行なっていない。4 月 13 日のデータに関しては、一露出型偏光観測モードのオフセット角を求めるために行ったので、通常の偏光観測のデータはない。

4.1.3.2 偏光方位角原点の評価

偏光方位角原点を定めるにあたって、カタログ値が利用できる R バンドでの偏光方位角を用いる。表 3.1 で示してある偏光方位角は V バンドのものであるため、それを R バンドとして利用するには注意が必要である。

Schmidt 他 (1992)[14] の論文に、いくつかの強偏光標準星の可視光で観測した、偏光度、偏光方位角の表がある。強偏光標準星 BD+64d106 に関しては論文の R バンドの偏光方位角 ($96.74^\circ \pm 0.54^\circ$) をカタログ値として用いることとする。他の天体は、論文の他の強偏光標準星を見ても、V バンドの偏光方位角と R バンドの偏光方位角の差は典型的に 1° 未満と無視できるレベルであるため、Turnshek 他 (1990)[15] の論文の V バンドの値 (HD251204 は 147° 、HD155197 は 102.88°) をそのままカタログ値として用いることとする。

観測結果の偏光方位角からカタログ値を引くことで、器械座標と天球座標の回転角の正方向が一致しているかどうか、通常の偏光モード (半波長板を用いたモード) と一露出型偏光モードのそれぞれで確認する。器械座標から天球座標の値を引く際には、 0° から 180° の範囲になるように、 180° の加減算を行っている。その結果を表 4.17 に示す。

表 4.17 から、通常の偏光観測モード (swol+hw、dwol+hw0、dwol+hw45 の 3 モード) に関しては、モードごとに HD251204 から BD+64d106 を引いた値が 8° 以内で収まっている。カタログ値の偏光方位角が数度ずれていることはしばしば見られるので、観測の誤差として説明が可能である。以上のことより、通常の偏光モードの器械座標と天球座標の回転方向は一致していることが明らかとなった。

一方、一露出型偏光観測モードは BD+64d106、HD251204(2/21) を除けば 6° 程度で収まるので、同様に器械座標と天球座標の回転方向は一致しているといえる。ダブルウォラストンを用いる際は光量が小さ

表 4.17: R バンドの各モードでの器械座標と天球座標の偏光方位角の差 (単位:度)

| 天体名 | 項目 | 観測値 (器械座標) | カタログ値 (天球座標) | 器械座標-天球座標 |
|----------------|-----------|------------|--------------|-----------|
| BD+64d106 | swol+hw | 64.70 | 96.74 | 147.96 |
| | dwol+hw0 | -19.83 | 96.74 | 63.43 |
| | dwol+hw45 | 25.08 | 96.74 | 108.34 |
| | dwol | 89.16 | 96.74 | 172.42 |
| HD251204(1/19) | swol+hw | -59.60 | 147 | 153.40 |
| | dwol+hw0 | 25.42 | 147 | 58.42 |
| | dwol+hw45 | 78.93 | 147 | 111.93 |
| | dwol | -29.93 | 147 | 3.06 |
| HD155197(2/21) | swol+hw | 68.22 | 102.88 | 145.35 |
| | dwol+hw0 | -30.73 | 102.88 | 46.39 |
| | dwol+hw45 | 32.90 | 102.88 | 110.02 |
| | dwol | 84.70 | 102.88 | 161.82 |
| HD251204(4/13) | dwol+hw0 | 28.43 | 147 | 61.42 |
| | dwol+hw45 | 78.64 | 147 | 111.64 |
| | dwol | -29.09 | 147 | 3.91 |
| HD155197(4/13) | dwol+hw0 | -22.93 | 102.88 | 54.19 |
| | dwol+hw45 | 30.31 | 102.88 | 107.43 |
| | dwol | -79.08 | 102.88 | 178.04 |

くなるため、うまく測光できない場合がある。BD+64d106、HD251204(2/21) はどちらも像が綺麗に映っていなかったため、一露出型変更観測モードに関しては値を採用しないこととする。

表 4.18 では、本研究で観測した強偏光標準星のデータより求めた、R バンドのオフセット角を記している。データの値はモードごとに表 4.17 の値を平均したものであるが、同じ天体で一旦平均を取り、3 天体の平均の値を記している。また、上にも述べたが一露出型変更観測モードに関しては、HD251204 と HD155197(4/13) の 2 天体の平均である。

表 4.18: R バンドの各モードでのオフセット角 (単位:度)

| 項目 | オフセット角 |
|-----------|--------|
| swol+hw | 148.90 |
| dwol+hw0 | 54.48 |
| dwol+hw45 | 109.65 |
| dwol | 0.76 |

4.1.4 視野内依存性

視野内依存性の評価は表 4.19 に示したように本研究では 3 日に分けて観測した。2017 年 1 月 25 日は強偏光標準星 (SP) の HD251204 を一露出型偏光観測モードでのみ行ったため、偏光度の計算の際には平均の k_e/k_o を用いた。2 月 21 日以降は無偏光標準星 (UP) を観測し、半波長板を用いた観測も行なっているため、 k_e/k_o はその日取得したものをを用いている。視野位置は図 4.9、4.10 であり、天体をその位置に持って行き観測した。視野位置①は上下左右に 2 分角ずつ動かしたあたりに天体を持ってきている。視野位置②では 1 分角ずつ天体を動かした。近赤外線 (H バンド) の観測の精度は可視光よりも悪くなるため、4 月 27 日では可視光 (R バンド) のみ観測を行った。観測結果ではそれぞれの視野位置での偏光度、偏光方位角をモデル図 (可視光のみ) とともに示している。

表 4.19: 視野内依存性の観測

| 観測日 | 観測天体 | 視野位置 | 観測バンド | 観測モード |
|-----------|--------------|------|-------|----------------|
| 2017/1/25 | HD251204(SP) | ① | H,R | dwol |
| 2017/2/21 | HD94851(UP) | ① | H,R | dwol+hw , dwol |
| 2017/4/27 | HD154892(UP) | ①② | R | dwol+hw , dwol |

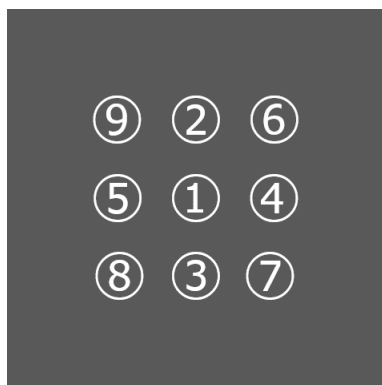


図 4.9: 視野位置①

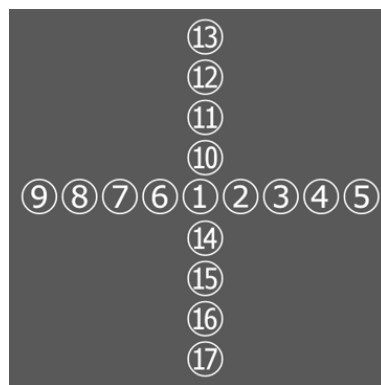


図 4.10: 視野位置②

4.1.4.1 観測結果 (視野内依存性)

表 4.20: 2017年1月25日 HD251204 の偏光データ (視野内依存性)

| 視野座標 | $Q/I(\%)$ | $U/I(\%)$ | 偏光度 (%) ¹ | 偏光度 (消偏光補正後) | 偏光方位角 (°) ¹ |
|------------|------------------|------------------|----------------------|-----------------|------------------------|
| 近赤外線 H バンド | | | | | |
| ① | 1.11 ± 0.29 | -0.83 ± 0.67 | 1.38 ± 0.46 | 1.50 ± 0.78 | -18.49 ± 11.62 |
| ② | 2.50 ± 0.30 | -0.21 ± 0.22 | 2.51 ± 0.30 | 2.73 ± 1.13 | -2.45 ± 2.50 |
| ③ | 0.11 ± 0.19 | -0.89 ± 0.20 | 0.89 ± 0.20 | 0.97 ± 0.44 | -41.4 ± 6.25 |
| ④ | 0.39 ± 0.17 | -1.45 ± 0.30 | 1.50 ± 0.29 | 1.63 ± 0.72 | -37.41 ± 3.52 |
| ⑤ | 0.44 ± 0.17 | 0.09 ± 0.24 | 0.45 ± 0.18 | 0.49 ± 0.27 | 6.12 ± 15.41 |
| ⑥ | 1.91 ± 0.23 | -1.73 ± 0.24 | 2.58 ± 0.24 | 2.80 ± 1.15 | -21.14 ± 2.66 |
| ⑦ | -0.67 ± 0.31 | -0.69 ± 0.28 | 0.96 ± 0.30 | 1.05 ± 0.53 | -67.16 ± 8.91 |
| ⑧ | -0.15 ± 0.12 | -0.99 ± 0.54 | 1.01 ± 0.53 | 1.09 ± 0.72 | -49.24 ± 4.06 |
| ⑨ | 2.51 ± 0.10 | 0.93 ± 0.09 | 2.67 ± 0.10 | 2.90 ± 1.16 | 10.14 ± 1.00 |
| 可視光 R バンド | | | | | |
| ① | 1.49 ± 0.07 | -2.38 ± 0.15 | 2.81 ± 0.13 | 4.97 ± 0.56 | -28.95 ± 1.02 |
| ② | 0.73 ± 0.20 | -2.55 ± 0.20 | 2.65 ± 0.20 | 4.69 ± 0.59 | -36.95 ± 2.19 |
| ③ | 2.38 ± 0.05 | -2.23 ± 0.06 | 3.27 ± 0.06 | 5.77 ± 0.60 | -21.58 ± 0.49 |
| ④ | 1.58 ± 0.10 | -1.42 ± 0.13 | 2.12 ± 0.12 | 3.75 ± 0.44 | -21.02 ± 1.60 |
| ⑤ | -0.11 ± 0.08 | -2.61 ± 0.09 | 2.61 ± 0.09 | 4.61 ± 0.50 | -46.26 ± 0.84 |
| ⑥ | 0.92 ± 0.06 | -2.44 ± 0.03 | 2.61 ± 0.03 | 4.60 ± 0.48 | -34.63 ± 0.63 |
| ⑦ | 2.79 ± 0.07 | -0.93 ± 0.13 | 2.94 ± 0.08 | 5.19 ± 0.55 | -9.23 ± 1.21 |
| ⑧ | 1.12 ± 0.09 | -3.35 ± 0.16 | 3.53 ± 0.16 | 6.24 ± 0.70 | -35.71 ± 0.79 |
| ⑨ | -0.26 ± 0.08 | -1.92 ± 0.07 | 1.93 ± 0.07 | 3.42 ± 0.38 | -48.88 ± 1.19 |

¹ 器械座標のままであり、消偏光、偏光方位角原点による補正は行っていない値である。

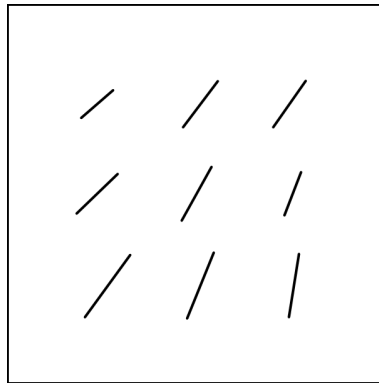


図 4.11: HD251204 視野内依存性 (器械座標)

R バンドの方が光量が多く精度もいいので、R バンドだけで視野内依存性の評価をしていく。強偏光標準星で観測のデータのままでどのような依存性があるのかわかりにくいので、それぞれの視野上で偏光度、偏光方位角を表した図を作成した (図 4.11、4.12)。図 4.11 は表の値をそのまま使用して作成した図である。ただし、強偏光標準星で観測しているため、フレーム内の器械偏光を見るために、図 4.12 では偏光度、偏光方位角は中心を基準として考え、 Q/I と U/I の中心との差から、新たに偏光度、偏光方位角を示したものをを用いている。それを大雑把な器械偏光だと考える。その値を表 4.21 に示す。図中の四角はひとつのフレームを示しており、北 (フレームの上) の方向を 0° として、反時計周りを回転方向の正として考えている。

表 4.21: 視野内依存性の観測における視野中心との比較 (R バンド)

| 視野座標 | $Q/I - Q/I_{\text{①}}(\%)$ | $U/I - U/I_{\text{①}}(\%)$ | 偏光度 (%) | 偏光方位角 ($^\circ$) |
|------|----------------------------|----------------------------|---------|--------------------|
| ① | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ② | -0.76 | -0.17 | 0.78 | -83.69 |
| ③ | 0.89 | 0.15 | 0.90 | 4.67 |
| ④ | 0.08 | 0.96 | 0.96 | 42.52 |
| ⑤ | -1.61 | -0.23 | 1.63 | -85.98 |
| ⑥ | -0.57 | -0.06 | 0.57 | -87.23 |
| ⑦ | 1.29 | 1.45 | 1.94 | 24.13 |
| ⑧ | -0.37 | -0.97 | 1.03 | -55.46 |
| ⑨ | -1.76 | 0.46 | 1.82 | 82.62 |

図 4.12 から、偏光方位角に放射線状のパターンが見受けられる。通常、他の装置での器械偏光もそのようなパターンを示すことが判っており、すばる望遠鏡の観測装置のひとつである FOCAS でも報告されている [17]。また、偏光度が大きくても 2% 以内に収まることから、図 4.12 で示した量は器械偏光による成

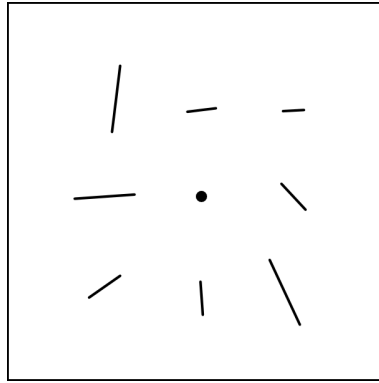


図 4.12: HD251204 視野内依存性

分である可能性があるが、より確実なものにするには、強偏光標準星でなく、無偏光標準星による同様の観測で確認する必要がある。

以下は無偏光標準星の観測データを示している。表の偏光方位角は器械座標から補正を行ったものである。2017年2月21日に無偏光標準星 HD94851 を一露出型偏光観測モードで取得し、結果は表 4.22-4.23、図 4.13-4.15 に示す。なお、視野座標①とは、図 4.9、4.10 中の①のことである。表 4.22 では、個々の座標で取得した k_e/k_o と視野座標①で取得した k_e/k_o を用いてそれぞれ偏光度、偏光方位角を計算し、比較している。表 4.23 では、ダブルウォラストンプリズムと半波長板を用いた通常偏光観測モードの 0° 側と 45° 側の比較である。図 4.9、4.10 はすべて R バンドのみを示している。

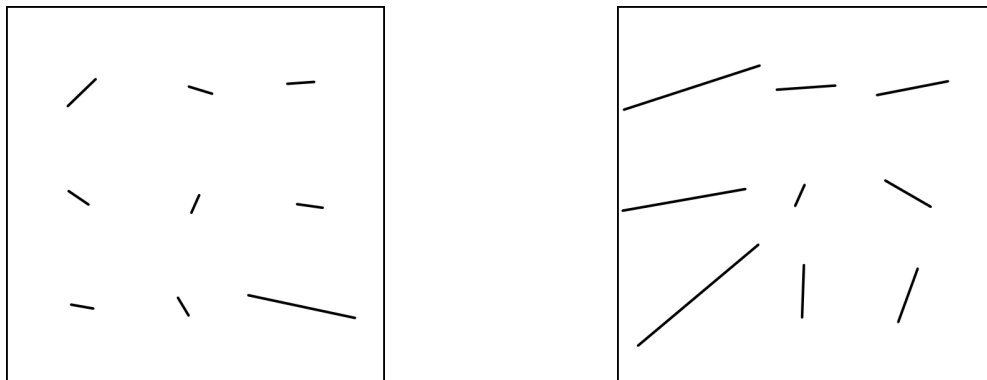


図 4.13: HD94851 視野内依存性 (R バンド、個々の k_e/k_o) 図 4.14: HD94851 視野内依存性 (R バンド、視野座標①の k_e/k_o)

2017年4月27日に無偏光標準星 HD154892 を一露出型偏光観測モードの R バンドのみで取得し、結果は表 4.24、図 4.16-4.19 に示す。この天体は、視野座標①と②で取得している。

規則性がありそうに思えるが、どの方向も同じように広がっているわけではなく、北方向だけパターンが違いそうだ。これは、瞳像が綺麗な円ではないことが関係しているのではないかと。瞳像について 4.2 で考察する。

表 4.22: 2017 年 2 月 21 日 HD94851 の偏光データ (視野内依存性)

| 視野座標 | 個々の k_e/k_o | | 視野座標①の k_e/k_o | |
|------------|-----------------|--------------------|------------------|--------------------|
| | 偏光度 (%) | 偏光方位角 (°) | 偏光度 (%) | 偏光方位角 (°) |
| 近赤外線 H バンド | | | | |
| ① | 0.54 ± 0.37 | 43.81 ± 21.17 | 0.54 ± 0.37 | 43.81 ± 21.17 |
| ② | 0.38 ± 0.20 | -64.42 ± 12.64 | 1.29 ± 0.17 | 9.27 ± 4.36 |
| ③ | 0.61 ± 0.08 | -95.90 ± 19.78 | 0.87 ± 0.31 | 58.46 ± 9.63 |
| ④ | 0.36 ± 0.43 | -22.14 ± 28.65 | 1.23 ± 0.46 | 77.87 ± 7.57 |
| ⑤ | 0.69 ± 0.38 | 38.57 ± 10.81 | 1.32 ± 0.35 | 54.36 ± 6.57 |
| ⑥ | 3.05 ± 0.38 | -87.26 ± 6.87 | 0.35 ± 0.68 | -68.23 ± 37.69 |
| ⑦ | 2.80 ± 1.38 | -29.51 ± 14.31 | 0.04 ± 1.53 | 32.40 ± 846.04 |
| ⑧ | 1.94 ± 0.84 | -62.37 ± 15.04 | 2.01 ± 0.88 | -68.46 ± 14.01 |
| ⑨ | 0.88 ± 1.92 | -49.51 ± 41.32 | 1.36 ± 1.28 | -11.97 ± 40.65 |
| 可視光 R バンド | | | | |
| ① | 0.18 ± 0.14 | -25.19 ± 23.57 | 0.18 ± 0.14 | -25.19 ± 23.57 |
| ② | 0.22 ± 0.08 | 72.56 ± 14.11 | 0.80 ± 0.05 | -85.18 ± 4.50 |
| ③ | 0.19 ± 0.13 | 30.71 ± 12.63 | 0.71 ± 0.06 | -2.40 ± 5.67 |
| ④ | 0.07 ± 0.11 | 55.94 ± 110.85 | 0.97 ± 0.15 | 60.63 ± 7.07 |
| ⑤ | 0.22 ± 0.05 | 55.74 ± 5.85 | 1.69 ± 0.04 | -79.77 ± 0.83 |
| ⑥ | 0.24 ± 0.14 | -87.34 ± 3.37 | 0.98 ± 0.13 | -78.83 ± 1.81 |
| ⑦ | 0.94 ± 0.37 | 78.10 ± 14.29 | 0.77 ± 0.12 | -19.24 ± 4.88 |
| ⑧ | 0.20 ± 0.11 | 79.57 ± 28.96 | 2.13 ± 0.22 | -49.12 ± 1.24 |
| ⑨ | 0.35 ± 0.31 | -47.21 ± 7.25 | 1.94 ± 0.20 | -72.14 ± 3.70 |

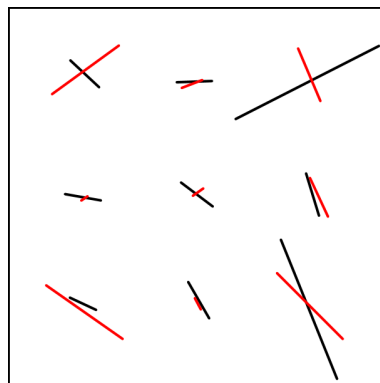


図 4.15: HD94851 視野内依存性 (R バンド、黒:0° 側、赤:45° 側)

表 4.23: 2017 年 2 月 21 日 HD94851 の偏光データ (視野内依存性、通常の偏光観測モード成分)

| 視野座標 | 0° 側 | | 45° 側 | |
|------------|---------|-----------|---------|-----------|
| | 偏光度 (%) | 偏光方位角 (°) | 偏光度 (%) | 偏光方位角 (°) |
| 近赤外線 H バンド | | | | |
| ① | 0.37 | 131.40 | 0.26 | 147.70 |
| ② | 0.21 | 177.88 | 0.34 | 37.66 |
| ③ | 0.33 | 67.00 | 0.19 | -12.50 |
| ④ | 1.03 | 93.37 | 0.30 | 83.81 |
| ⑤ | 0.76 | 150.13 | 0.64 | 98.10 |
| ⑥ | 0.95 | 97.06 | 0.52 | 16.56 |
| ⑦ | 1.38 | 74.07 | 0.82 | 134.82 |
| ⑧ | 2.36 | 191.09 | 0.31 | 85.56 |
| ⑨ | 0.57 | 101.61 | 0.16 | 38.16 |
| 可視光 R バンド | | | | |
| ① | 0.11 | 53.24 | 0.03 | 125.39 |
| ② | 0.10 | 88.75 | 0.06 | 11.28 |
| ③ | 0.11 | 30.85 | 0.03 | 28.97 |
| ④ | 0.12 | 16.67 | 0.11 | 25.74 |
| ⑤ | 0.10 | 80.04 | 0.02 | 124.78 |
| ⑥ | 0.44 | 117.68 | 0.15 | 23.88 |
| ⑦ | 0.40 | 22.71 | 0.25 | 45.85 |
| ⑧ | 0.08 | 65.76 | 0.25 | 55.01 |
| ⑨ | 0.11 | 47.41 | 0.22 | 126.41 |

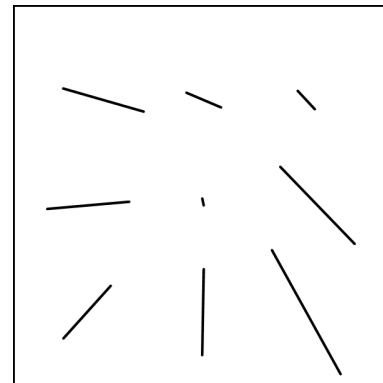
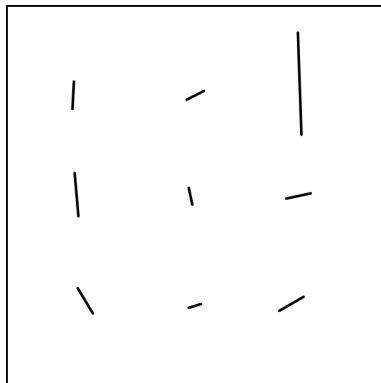


図 4.16: HD154892 視野内依存性 (視野位置①、個々 図 4.17: HD154892 視野内依存性 (視野位置①、視野の k_e/k_o) 座標①の k_e/k_o)

表 4.24: 2017 年 4 月 27 日 HD154892 の偏光データ (視野内依存性、R バンドのみ)

| 視野座標 | 個々の k_e/k_o | | 視野座標①の k_e/k_o | |
|-------|---------------|----------------|------------------|----------------|
| | 偏光度 (%) | 偏光方位角 (°) | 偏光度 (%) | 偏光方位角 (°) |
| 視野位置① | | | | |
| ① | 0.10 ± 0.08 | 11.94 ± 21.33 | 0.10 ± 0.08 | 11.94 ± 21.33 |
| ② | 0.11 ± 0.05 | -63.02 ± 15.90 | 0.51 ± 0.05 | 66.14 ± 3.07 |
| ③ | 0.07 ± 0.05 | -72.77 ± 19.25 | 1.17 ± 0.05 | 66.14 ± 3.07 |
| ④ | 0.14 ± 0.08 | -78.00 ± 12.01 | 1.45 ± 0.05 | 44.11 ± 1.57 |
| ⑤ | 0.24 ± 0.05 | 4.80 ± 6.00 | 1.12 ± 0.05 | -1.23 ± 1.09 |
| ⑥ | 0.56 ± 0.73 | 2.44 ± 11.06 | 0.34 ± 0.20 | 43.36 ± 62.04 |
| ⑦ | 0.15 ± 0.08 | -59.99 ± 12.22 | 1.92 ± 0.08 | 28.86 ± 0.98 |
| ⑧ | 0.16 ± 0.29 | 31.39 ± 27.10 | 0.96 ± 0.32 | -42.19 ± 2.30 |
| ⑨ | 0.15 ± 0.04 | -2.67 ± 14.03 | 1.13 ± 0.05 | 73.81 ± 1.68 |
| 視野位置② | | | | |
| ① | 0.05 ± 0.06 | -16.78 ± 23.43 | 0.05 ± 0.06 | -16.78 ± 23.43 |
| ② | 0.04 ± 0.07 | 0.97 ± 17.65 | 0.94 ± 0.04 | 29.68 ± 1.78 |
| ③ | 0.11 ± 0.08 | -50.38 ± 6.62 | 1.35 ± 0.08 | 47.27 ± 0.62 |
| ④ | 0.11 ± 0.00 | -46.19 ± 24.91 | 1.64 ± 0.04 | 58.86 ± 1.40 |
| ⑤ | 0.12 ± 0.05 | -62.05 ± 15.49 | 2.16 ± 0.06 | 67.88 ± 0.75 |
| ⑥ | 0.07 ± 0.05 | 13.60 ± 27.76 | 0.86 ± 0.05 | -74.22 ± 2.32 |
| ⑦ | 0.19 ± 0.07 | 31.89 ± 9.85 | 1.41 ± 0.07 | -85.62 ± 1.36 |
| ⑧ | 0.03 ± 0.04 | 7.22 ± 6.46 | 1.64 ± 0.04 | -84.67 ± 0.24 |
| ⑨ | 0.03 ± 0.05 | 69.59 ± 40.88 | 14.63 ± 0.05 | -50.11 ± 0.10 |
| ⑩ | 0.11 ± 0.04 | -21.53 ± 10.80 | 0.32 ± 0.04 | 78.59 ± 3.87 |
| ⑪ | 0.08 ± 0.05 | -72.73 ± 13.02 | 0.49 ± 0.05 | 74.61 ± 1.69 |
| ⑫ | 0.03 ± 0.05 | -72.73 ± 13.02 | 0.60 ± 0.04 | 81.61 ± 1.25 |
| ⑬ | 0.05 ± 0.07 | 69.71 ± 43.75 | 0.58 ± 0.06 | 75.34 ± 4.28 |
| ⑭ | 0.03 ± 0.08 | -75.99 ± 65.66 | 0.35 ± 0.09 | 10.20 ± 5.81 |
| ⑮ | 0.04 ± 0.04 | 73.76 ± 43.36 | 1.04 ± 0.02 | -0.99 ± 1.89 |
| ⑯ | 0.22 ± 0.04 | 60.69 ± 4.73 | 2.00 ± 0.03 | -3.14 ± 0.69 |
| ⑰ | 0.07 ± 0.02 | 26.60 ± 11.21 | 3.16 ± 0.03 | -4.36 ± 0.17 |

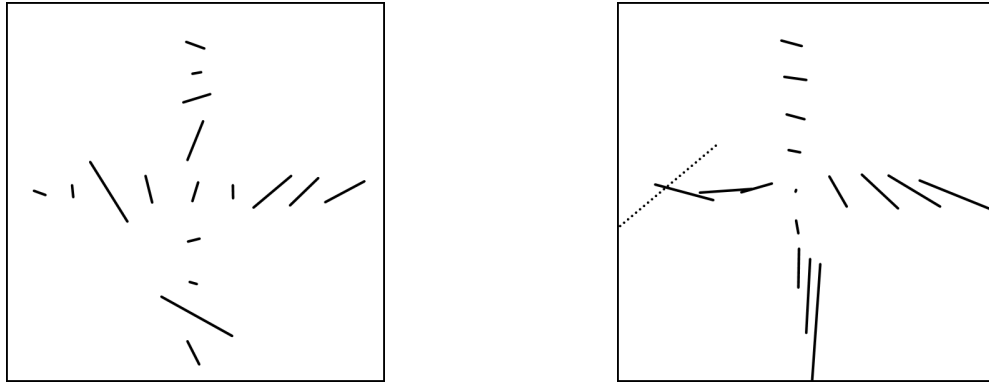


図 4.18: HD154892 視野内依存性 (視野位置②、個々) 図 4.19: HD154892 視野内依存性 (視野位置②、視野座標①の k_e/k_o)

4.2 瞳像の確認

4.1.4 で視野内依存性を確認した結果、瞳像が視野座標によって異なることが考えられた。そこで、各視野位置で得たデータをもとに瞳像がどのくらいずれているのか、また装置をどのように動かせば正しい瞳像の位置にダブルウォラストンプリズムを設置することができるのか考察する。

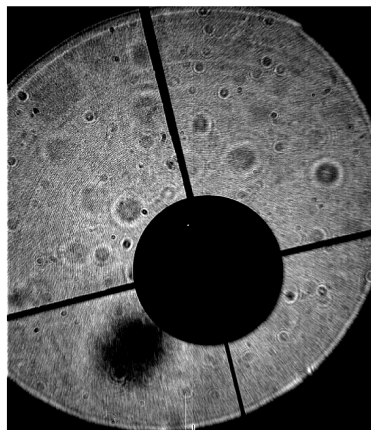


図 4.20: 瞳像 (ローテータ 90 度)

図 4.20 は、瞳確認レンズを用いて瞳像を確認した図の一つである。図中の真ん中の黒丸が副鏡の影であり、十字上の線はスパイダーの影である。この図を見てもわかるように、瞳像前回は綺麗な円になっていない。4.2.2 にて、ローテータを回転した時の瞳像の変化について詳しく述べる。

4.2.1 ダブルウォラストンプリズムの視野座標の違いによる透過光量比の違い

視野内依存性の確認で使用した無偏光標準星の偏光データである、2月21日と4月27日のデータを用いて考察する。まず、4月27日の視野位置②(17か所の視野)で観測したダブルウォラストンプリズムと半

波長板を用いた通常モードのデータを用いて、x 軸 (東西) 方向、y 軸 (南北) 方向でダブルウォラストンプリズムに入る左右の光量比 (R_{west} 、 R_{east}) とそれぞれの常光異常光の比 (R_{k1o} 、 R_{k1e} 、 R_{k0o} 、 R_{k0e}) の変化をプロットした (図 4.21、4.22)。横軸は中心の座標を 0 分角として、それぞれ中心から何分角視野座標がずれているかを示している。なお、x 軸のプラスの方向は西であり、マイナスの方向は東である。また、y 軸のプラスの方向は北であり、マイナスの方向は南とした。縦軸はプリズム全体に入った光量に対するそれぞれの光量の割合である。それぞれの数値は、以下のように求めた。

$$R_{west} = \frac{I_{1o}(0^\circ) + I_{1e}(0^\circ)}{I_{total}(0^\circ)} + \frac{I_{1o}(45^\circ) + I_{1e}(45^\circ)}{I_{total}(45^\circ)} + \frac{I_{1o}(22.5^\circ) + I_{1e}(22.5^\circ)}{I_{total}(22.5^\circ)} + \frac{I_{1o}(67.5^\circ) + I_{1e}(67.5^\circ)}{I_{total}(67.5^\circ)}$$

$$R_{east} = \frac{I_{0o}(0^\circ) + I_{0e}(0^\circ)}{I_{total}(0^\circ)} + \frac{I_{0o}(45^\circ) + I_{0e}(45^\circ)}{I_{total}(45^\circ)} + \frac{I_{0o}(22.5^\circ) + I_{0e}(22.5^\circ)}{I_{total}(22.5^\circ)} + \frac{I_{0o}(67.5^\circ) + I_{0e}(67.5^\circ)}{I_{total}(67.5^\circ)}$$

$$R_{k1o} = \frac{I_{1o}(0^\circ)}{I_{total}(0^\circ)} + \frac{I_{1o}(45^\circ)}{I_{total}(45^\circ)} + \frac{I_{1o}(22.5^\circ)}{I_{total}(22.5^\circ)} + \frac{I_{1o}(67.5^\circ)}{I_{total}(67.5^\circ)}$$

$$R_{k1e} = \frac{I_{1e}(0^\circ)}{I_{total}(0^\circ)} + \frac{I_{1e}(45^\circ)}{I_{total}(45^\circ)} + \frac{I_{1e}(22.5^\circ)}{I_{total}(22.5^\circ)} + \frac{I_{1e}(67.5^\circ)}{I_{total}(67.5^\circ)}$$

$$R_{k0o} = \frac{I_{0o}(0^\circ)}{I_{total}(0^\circ)} + \frac{I_{0o}(45^\circ)}{I_{total}(45^\circ)} + \frac{I_{0o}(22.5^\circ)}{I_{total}(22.5^\circ)} + \frac{I_{0o}(67.5^\circ)}{I_{total}(67.5^\circ)}$$

$$R_{k0e} = \frac{I_{0e}(0^\circ)}{I_{total}(0^\circ)} + \frac{I_{0e}(45^\circ)}{I_{total}(45^\circ)} + \frac{I_{0e}(22.5^\circ)}{I_{total}(22.5^\circ)} + \frac{I_{0e}(67.5^\circ)}{I_{total}(67.5^\circ)}$$

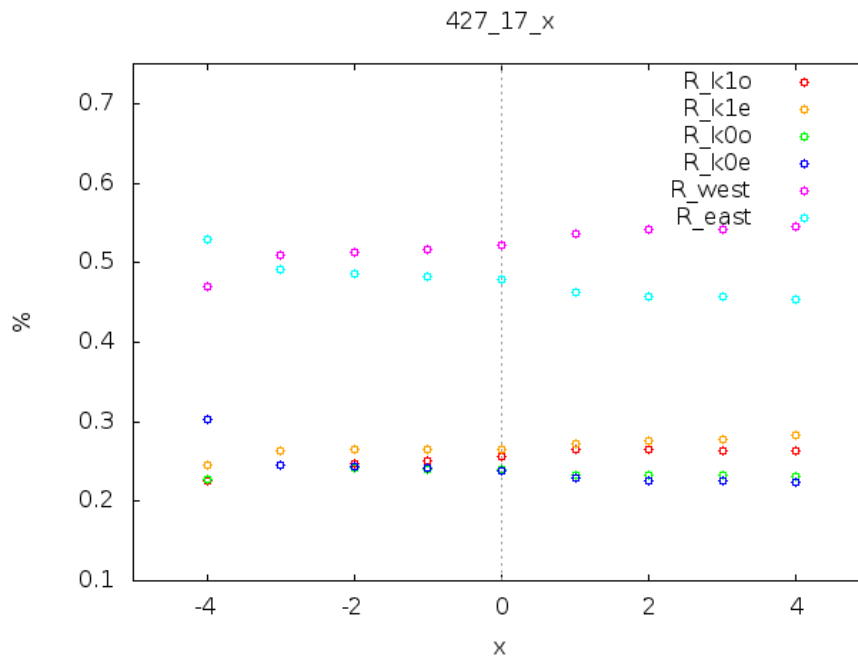


図 4.21: 4月27日 x 軸 (東西) 方向

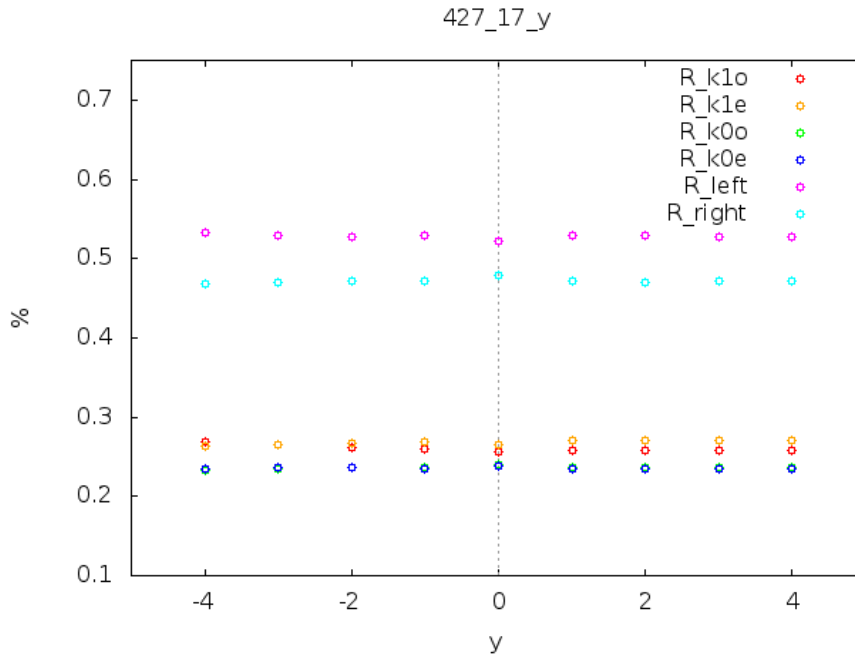


図 4.22: 4月27日 y 軸 (南北) 方向

y 軸 (南北) 方向 (図 4.21) には変化がほとんど見られないが、x 軸 (東西) 方向 (図 4.22) では変化がみられるので、x 軸方向の変化から瞳像の変化を考察する。x 軸方向に関しては、2月21日と4月27日の視野位置①(9か所の視野)の観測データを加えて、データが複数ある座標はその視野座標での光量の平均をとり、図 4.23 にプロットした。西側、東側の光量で比べることで、プリズムに当たる瞳像のズレを計算できるので、その光量比と計算結果を表 4.25 に示す。なお、x 座標は、視野の中心を 0 として、東方向をマイナス、西方向をプラスとした。東 ÷ 西は東側光量から、西側光量を割ったもので、x 座標が-4 の時のみ、東側光量に比べて西側光量が小さいので、西 ÷ 東としている。

西側、東側の光量比から瞳像のズレの計算方法を以下に示す。計算を簡単にするために、瞳像は円として考え、そのズレはダブルウォラストンプリズムの左右の境界に対して垂直方向にずれていることとする。(図 4.24)

まず、x 軸 (東西) 方向のズレから考える。瞳像の大きさとしてプリズムのマスク (光が通過できる範囲) の大きさは等しく r mm (26mm) で、中心のズレは x 軸方向に h mm ズれているとすると、図中のプリズムの左側の黄色で塗られた面積 S は以下のように計算できる。

$$S = r^2 \arccos \frac{h}{r} - h \sqrt{r^2 - h^2} \quad (4.1)$$

一方、図で見た時のプリズムの右側の光が当たる面積 S_{half} は、中心のズレが小さい時には、半円と考えることができるので、計算すると以下ようになる。

$$S_{half} = \frac{1}{2} \pi r^2 = 1061.86 \text{ mm}^2 \quad (4.2)$$

表 4.25 中の光量の比をそのまま面積比と考え、割合の多い方に瞳像の中心が寄っていると考えられる。

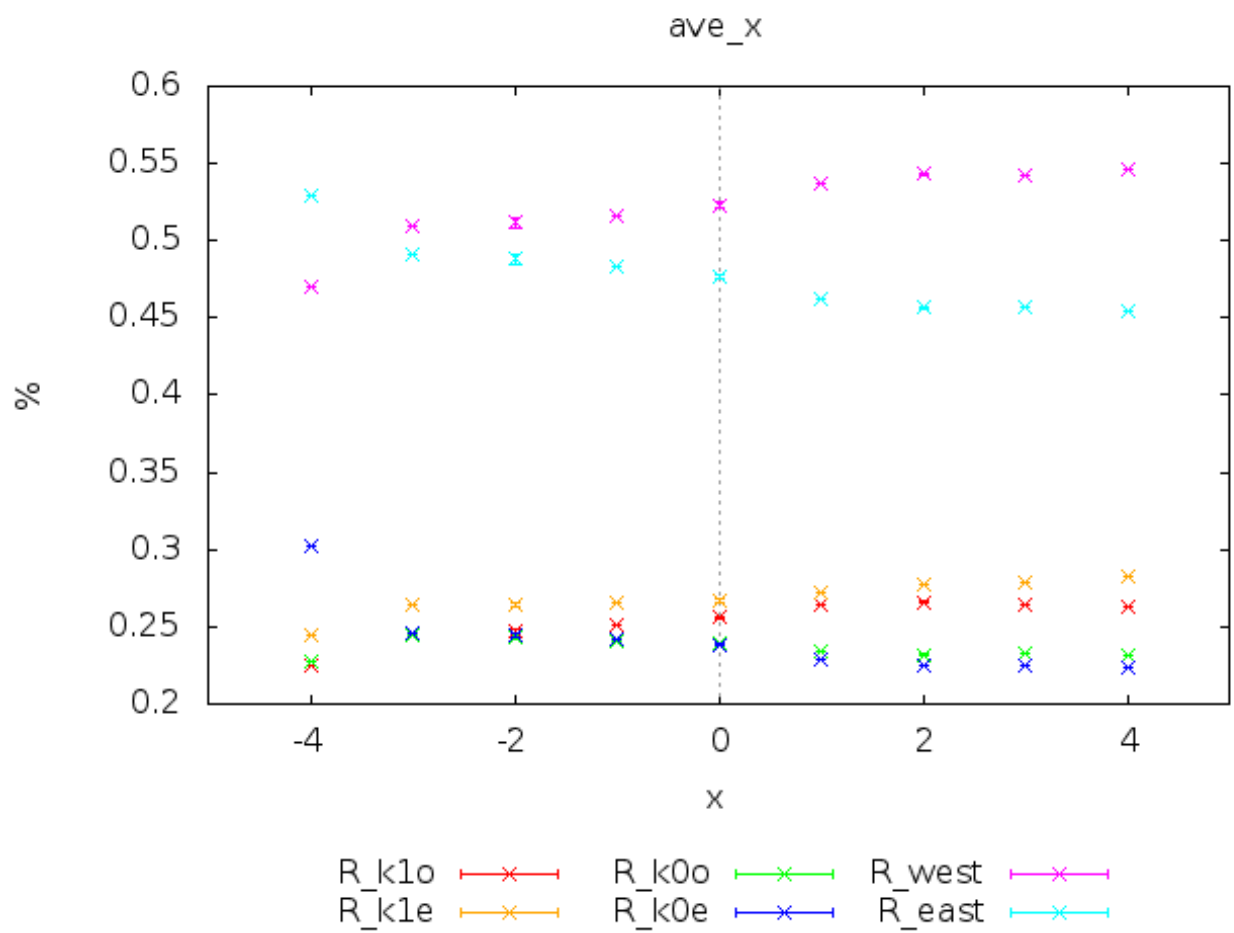


图 4.23: x 轴平均

表 4.25: x 軸方向の光量の変化と瞳像のずれ

| x 座標 (分角) | 西側光量 (%) | 東側光量 (%) | 東 ÷ 西 | 西方向へのズレ (mm) | z 方向のズレ (mm) |
|-----------|----------|----------|-------------|--------------|--------------|
| -4 | 0.47 | 0.53 | 0.89(西 ÷ 東) | -2.30 | 58.71 |
| -3 | 0.51 | 0.49 | 0.96 | 0.76 | 19.97 |
| -2 | 0.51 | 0.49 | 0.95 | 0.95 | 24.58 |
| -1 | 0.52 | 0.48 | 0.94 | 1.32 | 27.87 |
| 0 | 0.52 | 0.48 | 0.91 | 1.80 | - |
| 1 | 0.54 | 0.46 | 0.86 | 2.83 | 59.08 |
| 2 | 0.54 | 0.46 | 0.84 | 3.26 | 41.67 |
| 3 | 0.55 | 0.45 | 0.84 | 3.26 | 41.67 |
| 4 | 0.55 | 0.45 | 0.83 | 3.44 | 23.38 |

光量の割合と式 4.1、4.2 から x 軸方向のズレが計算できる。

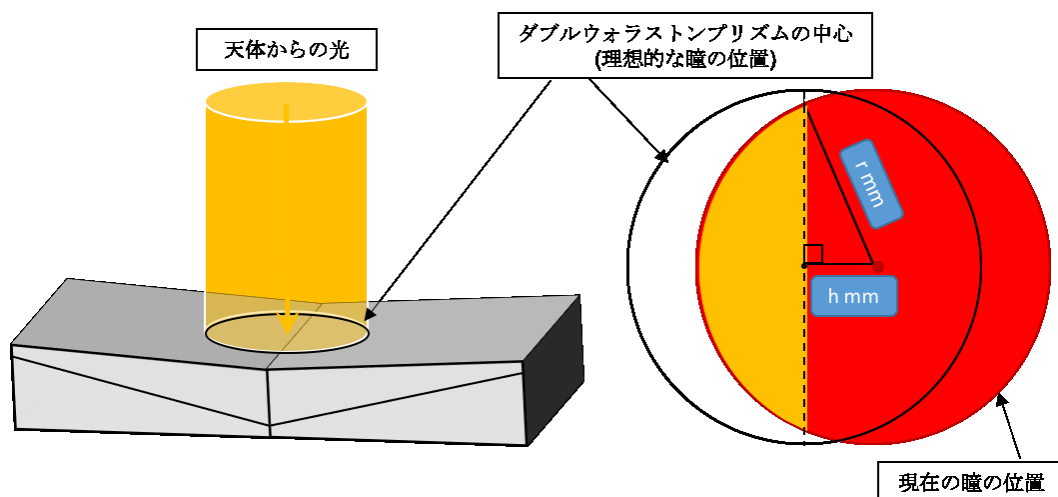


図 4.24: 東西方向の瞳像のズレ

次に z 軸方向のズレを考えてみる。取得した画像において星の位置が変わるのは、図 4.25 のようにプリズムへの入射角が異なるからである。表 4.25 において x 軸方向のズレが視野座標によって違っていることから、瞳像のズレは x 軸方向だけでないことが明らかである。そこで、z 軸方向のズレを以下の手順で計算する。

表 4.25 で得られた x 座標 0 分角の西方向のズレを各座標で補正し、n 分角の光は n° から入射すると仮定して計算する。ただし、光学素子の設定上、上下左右 5 分角の座標に映る星は中心座標に対して 5° の角度でプリズムに入射することがわかっており、微小角のときは $\theta = \tan\theta$ が成り立つことを利用する。

表中の z 方向のズレは等しいはずではあるが、そうっていないのは西方向のズレの誤差を考慮して

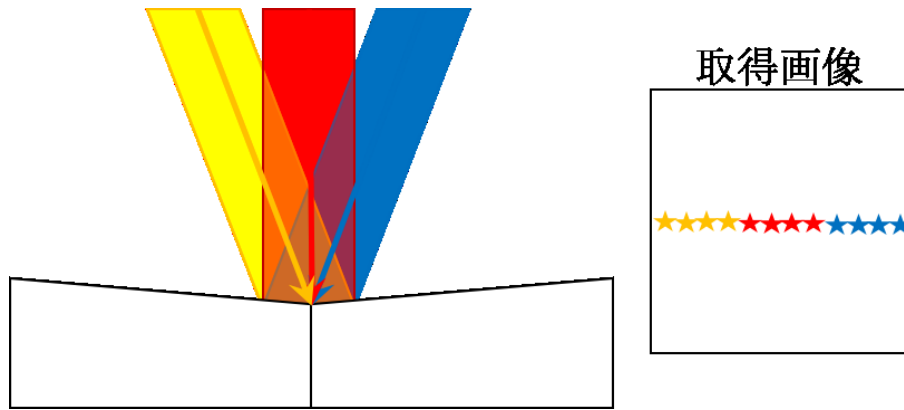


図 4.25: プリズムへの入射方向

いなかったためと考えられる。データ点が他の値と異なる x 座標-4 の点を除き、他の点で図 4.26 プロットし、最小二乗法により求めた直線をもとに、 z 方向のズレを計算しなおしてみる。プロットした直線は $y = 0.44x + 1.97$ となるので、左右 5 分角のときの瞳のズレを求めるために $x = \pm 5$ を代入する。同様に計算すると、25.12mm ズれているという結果が得られた。まとめると、現在プリズムは理想の瞳像の位置から西方向に 1.97mm、 z 方向プリズム上面方向に 25.12mm ズれていると考えられる。

しかし、どのくらいズれているのかという計算はしたものの、瞳が円であることを仮定したものであるため、正確であるとは言えないが、目安として考えるものとする。 x 軸方向のズレに関しては、他の方法でも確認ができるので、その確認方法と結果を次の 4.2.2 で述べる。

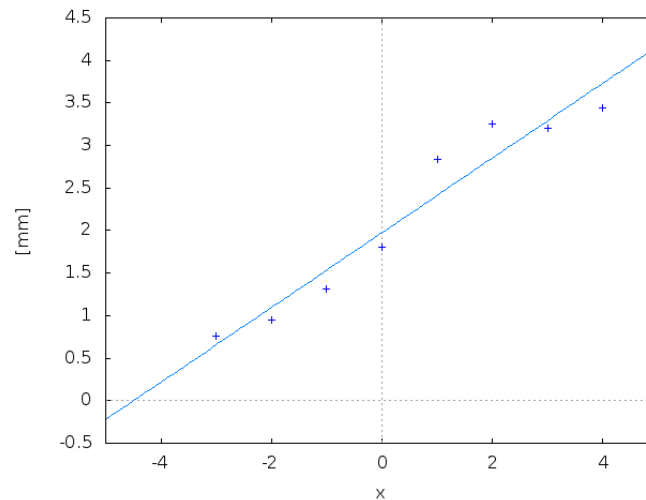


図 4.26: プリズムの西方向のズレ

4.2.2 ローテータを回転した際の瞳像の変化

ローテータを回転させると、HONIR 装置自体を主鏡に対して回転させることができる。その原点位置は毎回決まっているが、ローテータを回転させた時に瞳の形が変わることが知られている。瞳の形が変化するという事は、HONIR がかなた望遠鏡の光学軸に対してズレて取り付けられ、それは光軸に垂直方向にズレているのではなく、傾いてズレていると考えられる。

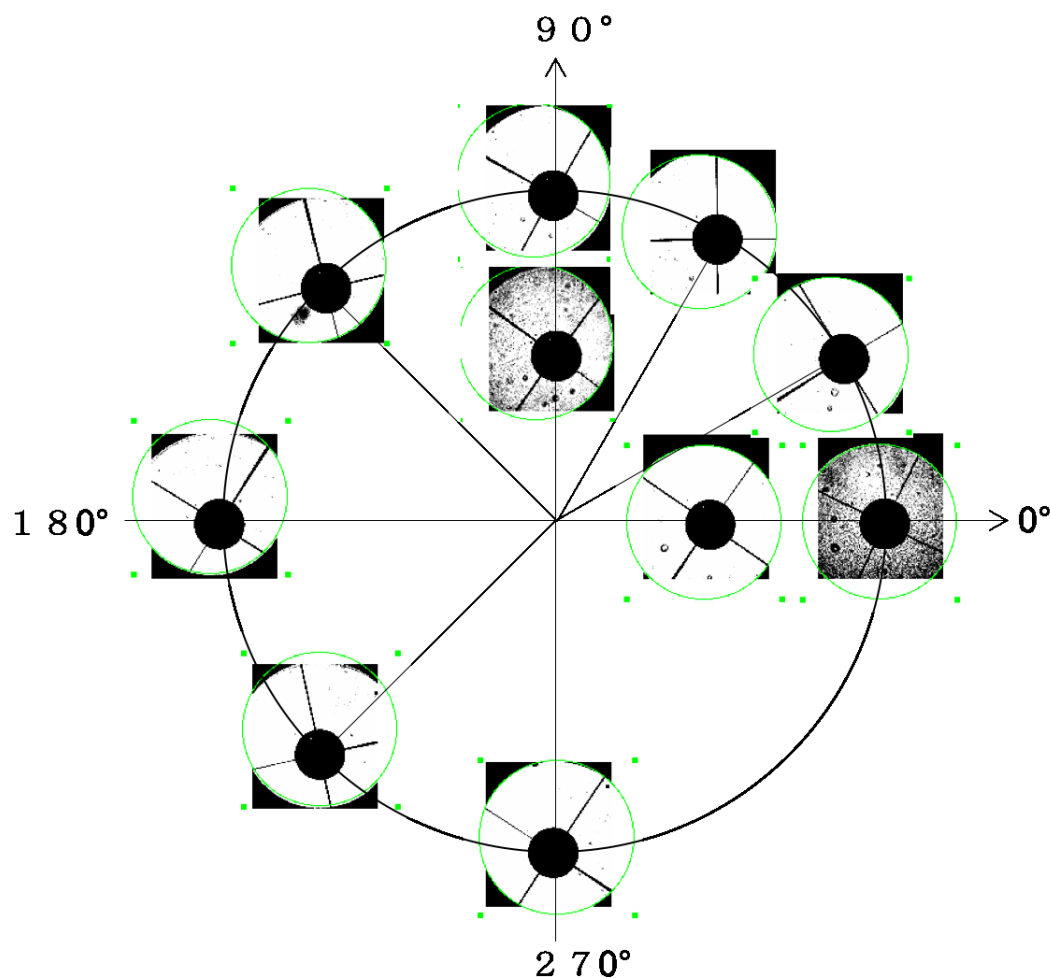


図 4.27: ローテータを回転した時の瞳像の変化

そこで、十分に明るい星をローテータを少しずつ回転しながら瞳確認レンズを用いて瞳の形を確認した(図 4.27)。角度はローテータの原点の位置からどのくらい回転させたかを示しており、 0° 、 90° は 2 回撮影したため、2 つ並べて示している。なお、瞳確認レンズとは可視光フィルターの位置に取り付けられているレンズで、瞳の形を画像に映すものである。図 4.27 より、緑の円で囲まれた部分が瞳像であると考えられる。目視で確認して半径を一定の円とし、図 4.28 中に青い円で表し、中心を緑の点で表した。135° 付近は瞳像の左上がが欠けており、その付近の画像すべて同じ部分が欠けており、副鏡(黒い円)を中心とした円

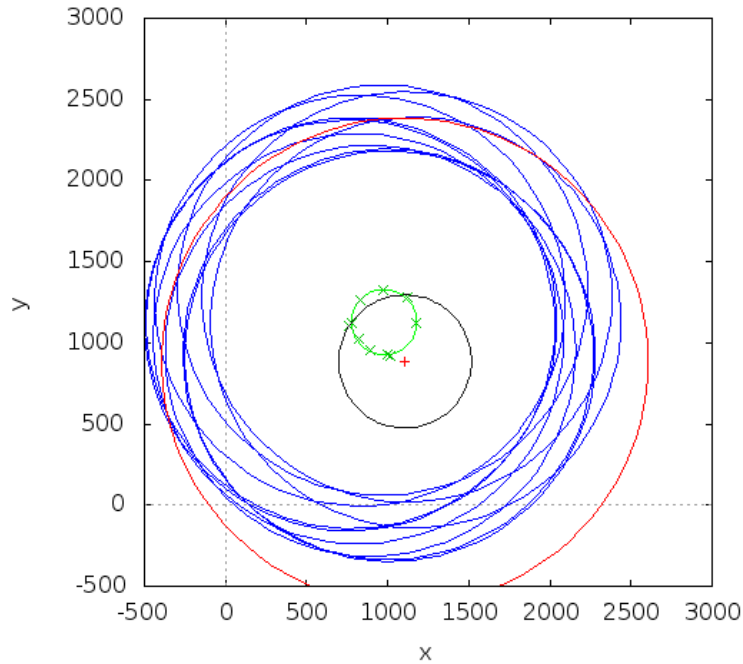


図 4.28: ローテータを回転させた時の瞳像の変化

のよう見え、それを仮定した場合、すべての画像で一致したので、その境界から考えられる円を赤い円として示す。つまり、実際の画像では、赤い丸より外側は欠けており光が入ってきていない部分となる。なお、青い丸の半径は 1265 ピクセル (瞳像であるなら直径 26 mm) であり、赤い丸の半径は 1500 ピクセル (約 30 mm)、黒い丸の半径は 410 ピクセル (約 4.2 mm)。また、副鏡も赤い円も、位置は常に一定になっているため、そこがローテータ回転の中心と一致していると考え、瞳像の中心がどのように変化しているのかを確認し、その中心の座標を図 4.28 にプロットし、円でフィッティングした (緑色の点と円)。そのフィッティングした円の式は、

$$(x - 978)^2 + (y - 1127)^2 = 201^2$$

であった。ただし単位は検出器のピクセルであり、半径 13 mm の瞳像が 1265 ピクセルであることから、この円の半径は 2.07 mm である。この値は、4.1.4 で求めた、プリズムの理想の瞳像の位置からのズレが 1.97mm である結果にほとんど等しい値であり、確認の方法が異なるが、同様のことを調査しているものである。つまり、プリズムは約 2mm 西方向にずれており、それは HONIR のかなた望遠鏡に対する傾きを示している。瞳像の映る位置はコリメータレンズ群の後であるので、コリメータレンズ群の焦点距離 (312 mm) を用いて傾きを計算する。

$$\tan\theta_{HONIR} = \frac{2}{312} \quad (4.3)$$

$$\theta_{HONIR} = 0.37^\circ \quad (4.4)$$

よって、HONIR は 0.37° ほど傾いて取り付けられていると考えられる。なお、瞳像の中心と、副鏡

の中心が最も近くなるローテータの角度を計算すると、原点から -20.8° であり、ローテータ角度は $72.4 - 20.8 = 51.6^\circ$ のときであった。

また、ローテータを回転させた時にスパイダーが回転することを目視で確認したが、その回転角と瞳像の中心の点が瞳像の回転の中心の点に対して同じように回転しているのか確認した。回転の中心の点は上記の円の方程式より、(987,1127) として計算した。その結果を図 4.29 で示す。縦軸がある 1 つのスパイダーの角度であり、横軸が瞳像の中心の点の瞳像の回転の中心の点 (987,1127) に対する角度である。結果は直線上に乗り、その傾きが 0.97。つまり、瞳像の中心の位置とスパイダーは同じように変化していることが明らかとなった。

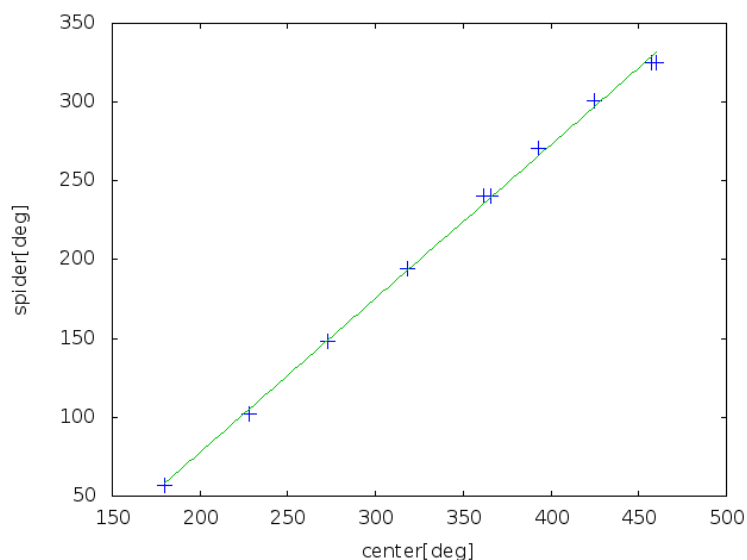


図 4.29: ローテータ回転時の瞳像の中心の位置とスパイダーの角度

4.3 一露出型偏光モードの性能評価

3.1 で述べた調査項目で通常偏光モードと一露出型偏光モードを比較しながら調査を行ってきた。調査の結果、偏光観測の誤差の指標ともなる器械偏光は、通常の偏光モードの近赤外線 H バンドは 0.2%、可視光 R バンドは 0.1% に対して、一露出型偏光モードは、観測後に取得した常光と異常光の透過効率比を用いた場合には、近赤外線 H バンドは 0.4%、可視光 R バンドでは 0.3% に収まることが明らかとなった。平均の常光と異常光の透過効率比を用いる際には、さらに 0.1% ほど器械偏光が大きくなる。

偏光能率は短波長側 (可視光側) になるほど悪くなるものの、通常の偏光観測モードと等しいことから、結晶の $LiYF_4$ の特性だと考えられる。また、広帯域対応の半波長板の光学軸には波長依存性があるため、偏光方位角の波長によるずれを観測によって確認した (図 4.8)。また、本研究において、器械座標と天球座標の回転方向が通常偏光モード、一露出型偏光モードどちらも一致しているという結果が得られた。視野内依存性については、器械偏光の視野内依存性がみられ偏光方位角は放射状に変化しているが、北方向だ

け異なった様子である。偏光度に関しては、視野中心の常光と異常光の透過効率比 (k_e/k_o) を用いた場合、外側になるほど大きくなる。

以上の点を踏まえ、現時点で一露出型偏光モードを使用して観測する際には、観測したい天体をできるだけ視野中心に持っていき、観測後はなるべく時間を置かずに、近くの明るい天体をほとんど同じ視野内に持ってきて、常光と異常光の透過効率比 (k_e/k_o) をダブルウォラストンプリズムと半波長版を用いた通常偏光モードにより求める必要がある。その際、近赤外線 H バンドではおよそ 0.4%、可視光 R バンドではおよそ 0.3% の器械偏光が生じる。

第5章 まとめと今後

可視近赤外線同時撮像カメラ HONIR での偏光観測は、半波長板とシングルウォラストンプリズムを用いた通常の偏光観測モードと、ダブルウォラストンプリズムを用いた一露出型偏光観測モードがある。ダブルウォラストンプリズムは、今年度から導入されたもので、まだ性能評価が行われていなかった。一露出型偏光観測は、秒から分スケールで変動するような突発天体の偏光観測に有効であり、可視光と近赤外線の同時に取得した偏光データは例が少ないため、貴重である。

一露出型偏光観測モードの評価の結果、装置内部で生成される偏光である器械偏光は、観測後に取得した常光と異常光の透過効率比 (k_e/k_o) を用いることにより、近赤外線 H バンドは 0.4%、可視光 R バンドでは 0.3% 程度ということが明らかとなった。また、100% 偏光フィルターを用いて観測した、偏光能率に関しては、短波長側になるほど偏光能率が悪くなるものの、 $LiYF_4$ の結晶の特性であることが明らかとなった(追記 45 ページの脚注を参照のこと)。本研究においては器械座標と天球座標の回転方向は通常の偏光観測モード、一露出型偏光観測モードとも一致しているという結果が得られた。また、偏光方位角の波長依存性や視野内の依存性を確認することができた。視野内依存性が同心円状に広がっていないのは瞳像が綺麗な円ではないことが原因だと思われる。各視野によって、常光と異常光の透過効率比 (k_e/k_o) が同じ時間でも異なるので、観測後はなるべく時間を置かず近く明るい天体をほとんど同じ視野内に持って行き、常光と異常光の透過効率比 (k_e/k_o) をダブルウォラストンプリズムと半波長板を用いた通常偏光観測モードによって求める必要がある。

今後は、器械偏光をより詳しく見るために、常光と異常光の透過効率比 (k_e/k_o) の変化を詳しく見る必要がある。主な原因として考えられるのが温度変化によるもの、望遠鏡の光学系によるものである。温度変化によるものは季節を通して観測する必要があるため、すぐに確かめることは難しそうではあるが、光学系によるものであれば、確認ができそうなので、そちらから行うものとする。評価方法は、ローテータだけをまわして装置のたわみによる変化を見る、同じローテータの向きで高度を変化させる、などして少しずつ環境を変えることにより原因を探る。

また、ガンマ線バーストの自動観測を HONIR で行い、可視光、近赤外線の同時観測データの取得を目指す。

瞳像のズレに関しては、偏光観測への影響は小さいと考えられるが、無いとは言い切れないので瞳像が綺麗な円になるように修正する必要がある。そのために瞳像の減光の原因を考え特定する必要がある。

第6章 付録

6.1 ミューラー行列を用いたストークスパラメータの導出

各光学素子のミューラー行列を示す。

半波長板

半波長板の方位角を θ とし、そのミューラー行列を A とする。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\theta - \sin^2 2\theta & 2 \cos 2\theta \sin 2\theta & 0 \\ 0 & 2 \cos 2\theta \sin 2\theta & \sin^2 2\theta - \cos^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

ウォラストンプリズム

透過軸の方位角を ϕ とし、そのミューラー行列を B とする。

$$\mathbf{B} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\phi & \sin 2\phi & 0 \\ \cos 2\phi & \cos^2 2\phi & \cos 2\phi \sin 2\phi & 0 \\ \sin 2\phi & \cos 2\phi \sin 2\phi & \sin^2 2\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$\phi = 0^\circ$ の場合、

$$\mathbf{B}_0 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$\phi = 90^\circ$ の場合、

$$\mathbf{B}_{90} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$\phi = 45^\circ$ の場合、

$$\mathbf{B}_{45} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$\phi = 135^\circ$ の場合、

$$\mathbf{B}_{135} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

6.1.1 通常の偏光観測モードの常光と異常光の強度 ($I_o(\theta)$ 、 $I_e(\theta)$) の導出

半波長板とシングルウォラストンプリズムからなる光学系に入る前のストークスベクトルを $\mathbf{I}_0 = (I_0, Q_0, U_0, V_0)$ とし、出てきた光の常光線のストークスベクトルを $\mathbf{I}_{1o} = (I_{1o}, Q_{1o}, U_{1o}, V_{1o})$ 、異常光線のストークスベクトルを $\mathbf{I}_{1e} = (I_{1e}, Q_{1e}, U_{1e}, V_{1e})$ とする。簡単に計算するために、ウォラストンプリズムの主軸を方位角の原点にとると、常光は $\phi = 0$ の時、異常光は $\phi = 90$ の時を用いるので、以下のようになる。

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_{1o} &= \mathbf{B}_0 \mathbf{A} \mathbf{I}_0 \\ \mathbf{I}_{1e} &= \mathbf{B}_{90} \mathbf{A} \mathbf{I}_0 \end{aligned}$$

常光の場合で計算する。

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_{1o} &= \mathbf{B}_0 \mathbf{A} \mathbf{I}_0 \\ &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\theta - \sin^2 2\theta & 2 \cos 2\theta \sin 2\theta & 0 \\ 0 & 2 \cos 2\theta \sin 2\theta & \sin^2 2\theta - \cos^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ Q_0 \\ U_0 \\ V_0 \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ Q_0(\cos^2 2\theta - \sin^2 2\theta) + 2U_0 \cos 2\theta \sin 2\theta \\ 2Q_0 \cos 2\theta \sin 2\theta + U_0(\sin^2 2\theta - \cos^2 2\theta) \\ -V_0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

今回用いるのは強度の成分のみなので、常光の強度成分 I_{1o} だけ計算する。

$$I_{1o} = \frac{I_0}{2} \left\{ 1 + \frac{Q_0}{I_0} \cos 4\theta + \frac{U_0}{I_0} \sin 4\theta \right\}$$

異常光も同様に計算すると、

$$I_{1e} = \frac{I_0}{2} \left\{ 1 - \frac{Q_0}{I_0} \cos 4\theta - \frac{U_0}{I_0} \sin 4\theta \right\}$$

6.1.2 一露出型偏光観測モードのストークスパラメータの導出

一露出型偏光観測モードに関して、ダブルウォラストンプリズムに入る前のストークスベクトルを $\mathbf{I}_0 = (I_0, Q_0, U_0, V_0)$ とし、出射する 0° 成分のストークスベクトルを $\mathbf{I}(0^\circ)$ とし、同様に $\mathbf{I}(90^\circ)$ 、 $\mathbf{I}(45^\circ)$ 、 $\mathbf{I}(135^\circ)$ を求め、ストークスパラメータ $I(0^\circ)$ 、 $I(90^\circ)$ 、 $I(45^\circ)$ 、 $I(135^\circ)$ から式 2.22、2.23 を導出する。ウォラストンプリズムの主軸を方位角の原点に取ると、 0° 成分は $\phi = 0$ の時、を用いるので、以下のようになる。

$$\begin{aligned} \mathbf{I}(0^\circ) &= \mathbf{B}_0 \mathbf{I}_0 \\ &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ Q_0 \\ U_0 \\ V_0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

ほかも同様にして、

$$\begin{aligned} \mathbf{I}(90^\circ) &= \mathbf{B}_{90} \mathbf{I}_0 \\ &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ Q_0 \\ U_0 \\ V_0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{I}(45^\circ) &= \mathbf{B}_{45} \mathbf{I}_0 \\ &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ Q_0 \\ U_0 \\ V_0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{I}(135^\circ) &= \mathbf{B}_{135} \mathbf{I}_0 \\ &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ Q_0 \\ U_0 \\ V_0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

ストークスパラメータ $I(0^\circ)$ 、 $I(90^\circ)$ 、 $I(45^\circ)$ 、 $I(135^\circ)$ を計算する。

$$\begin{aligned}I(0^\circ) &= \frac{1}{2}(I_0 + Q_0) = \frac{I_0}{2} \left(1 + \frac{Q_0}{I_0}\right) \\I(90^\circ) &= \frac{1}{2}(I_0 - Q_0) = \frac{I_0}{2} \left(1 - \frac{Q_0}{I_0}\right) \\I(45^\circ) &= \frac{1}{2}(I_0 + U_0) = \frac{I_0}{2} \left(1 + \frac{U_0}{I_0}\right) \\I(135^\circ) &= \frac{1}{2}(I_0 - U_0) = \frac{I_0}{2} \left(1 - \frac{U_0}{I_0}\right)\end{aligned}$$

$\frac{Q_0}{I_0}$ 、 $\frac{U_0}{I_0}$ を求める。

$$\begin{aligned}I(0^\circ) - I(90^\circ) &= \frac{I_0}{2} \frac{2Q_0}{I_0} \\I(0^\circ) + I(90^\circ) &= \frac{I_0}{2} \\I(45^\circ) - I(135^\circ) &= \frac{I_0}{2} \frac{2U_0}{I_0} \\I(45^\circ) + I(135^\circ) &= \frac{I_0}{2}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{Q_0}{I_0} &= \frac{I(0^\circ) - I(90^\circ)}{I(0^\circ) + I(90^\circ)} \\ \frac{U_0}{I_0} &= \frac{I(45^\circ) - I(135^\circ)}{I(45^\circ) + I(135^\circ)}\end{aligned}$$

よって、式 2.22、2.23 が得られた。

謝辞

本論文を作成するにあたり、指導教官である川端先生には大変お世話になりました。偏光観測についてほとんど知識がなかったため、基礎から教えていただきました。とても感謝しています。ありがとうございました。中岡さんには、HONIR の画像の処理や観測の方法など様々なことを教えていただきました。本当にありがとうございます。また、研究室の皆様には、研究についてだけでなく、様々な面で研究生生活を支えていただきました。皆様のおかげで、より良い研究を行えたと思っています。ありがとうございました。

参考文献

- [1] 高木勝俊 2011 年度 卒業論文 「かなた望遠鏡 1 露出型偏光撮像器 HOWPol の器械偏光に関する研究」(広島大学)
- [2] 観山正見・野本憲一・二間瀬敏史 2008 年 「天体物理学の基礎 II シリーズ現代の天文学 第 12 巻」(日本評論社)
- [3] 福井康雄・犬塚修一郎・大西利和・中井直正・舞原俊憲・水野亮 2008 年 「天体物理学の基礎 II シリーズ現代の天文学 第 6 巻」(日本評論社)
- [4] 広島大学 宇宙科学センター web ページ
https://www.hiroshima-u.ac.jp/hasc/institution/hho_kanata
- [5] Hiroshi Akitaya et al. 2014 Proc. SPIE,9147,914740
- [6] 小山勝二・嶺重慎 2007 年 「天体物理学の基礎 II シリーズ現代の天文学 第 8 巻」(日本評論社)
- [7] Gamma-ray Burst 970228: Score ! (Beppo-SAX の写真など)
<http://www.mpe.mpg.de/~jcg/grb970228.html>
- [8] NASA web ページ
<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/cgro/batse/>
- [9] HONIR 開発 wiki ページ (HONIR データ、写真など)
- [10] グレゴリウス講座 恒星進化論 (HR 図)
http://www.gregorius.jp/presentation/page_71.html
- [11] The STScI Digitized Sky Survey
https://archive.stsci.edu/cgi-bin/dss_form?target=HD251204&resolver=SIMBAD
- [12] Junior Research Paper: Spring 2013 Bizarre quasars in the BOSS survey
<https://www.cfa.harvard.edu/~bcook/research.html>
- [13] 家正則・岩室史英・舞原俊憲・水本好彦・吉田道利 2007 年 「天体物理学の基礎 II シリーズ現代の天文学 第 15 巻」(日本評論社)
- [14] Schmidt, Elston, & Lupie 1992, AJ, 104, 1563
- [15] Turnshek, et al. 1990, AJ, 99, 1243

- [16] SIMBAD Astronomical Database
<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>
- [17] Calibrations required for FOCAS polarimetry
<http://www.naoj.org/Observing/Instruments/FOCAS/pol/calibration.html>